



Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Институт радиоэлектроники
и информационных
технологий — РТФ

Ю. В. ШИЛОВ

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

Лабораторный практикум



Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Ю. В. Шилов

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
в качестве **лабораторного практикума**
для студентов, обучающихся по направлениям подготовки
11.03.01 «Радиотехника»,
11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2017

УДК 621.372(076.5)
ББК 32.841.2я73-5
Ш59

Рецензенты:

замзавкафедрой канд. техн. наук, доц. *Н. В. Будылдина* (кафедра общепрофессиональных дисциплин технических специальностей Уральского технического института связи и информатики);
канд. техн. наук, науч. сотр. лаборатории микромеханики материалов Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук *М. В. Мясникова*

Научный редактор — канд. техн. наук, доц. *М. П. Трухин*

Шилов, Ю. В.

Ш59 Радиотехнические цепи и сигналы : лабораторный практикум /Ю. В. Шилов. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 160 с.

ISBN 978-5-7996-2033-2

В издании приведено описание шести лабораторных работ по дисциплине «Радиотехнические цепи и сигналы», для выполнения которых используются программно-аппаратные средства National Instruments — среда графического программирования LabVIEW, пакет моделирования электронных схем Multisim и лабораторная станция NI ELVIS.

В практикуме приведены основные теоретические положения по тематике выполняемых работ, описание лабораторного стенда, задания для подготовки к работам, порядок выполнения работ и требования к оформлению отчетов, а также список используемых сокращений (см. прил. 10).

Библиогр.: 6 назв. Рис. 37. Прил. 10.

УДК 621.372(076.5)
ББК 32.841.2я73-5

ISBN 978-5-7996-2033-2

© Уральский федеральный
университет, 2017

Содержание

Порядок выполнения лабораторных работ.....	5
Лабораторная работа № 1	
Спектральный анализ периодических сигналов.....	8
1.1. Теоретическая часть	8
1.2. Домашнее задание	15
1.3. Описание лабораторного стенда.....	19
1.4. Экспериментальное задание	21
1.5. Содержание отчета	23
Контрольные вопросы	23
Лабораторная работа № 2	
Прохождение сигналов с амплитудной модуляцией через частотно-избирательную цепь	25
2.1. Теоретическая часть	25
2.2. Домашнее задание	32
2.3. Описание исследуемого модуля.....	34
2.4. Экспериментальное задание	36
2.5. Обработка результатов	42
2.6. Содержание отчета	43
Контрольные вопросы	44
Лабораторная работа № 3	
Исследование нелинейного резонансного усилителя	45
3.1. Теоретическая часть	45
3.2. Домашнее задание	56
3.3. Экспериментальное задание	58
3.4. Обработка результатов	63
3.5. Содержание отчета	64
Контрольные вопросы	65

Лабораторная работа № 4	
Исследование амплитудного модулятора	66
4.1. Теоретическая часть	66
4.2. Домашнее задание	71
4.3. Экспериментальное задание	74
4.4. Обработка результатов	80
4.5. Содержание отчета	81
Контрольные вопросы	82
Лабораторная работа № 5	
Детектирование амплитудно-модулированных сигналов	83
5.1. Теоретическая часть	83
5.2. Домашнее задание	91
5.3. Экспериментальное задание	93
5.4. Обработка результатов	99
5.5. Содержание отчета	100
Контрольные вопросы	101
Лабораторная работа № 6	
Исследование LC-автогенератора с трансформаторной обратной связью	103
6.1. Теоретическая часть	103
6.2. Домашнее задание	113
6.3. Экспериментальное задание	113
6.4. Содержание отчета	124
Контрольные вопросы	125
Библиографический список	127
Приложение 1	128
Приложение 2	129
Приложение 3	131
Приложение 4	134
Приложение 5	137
Приложение 6	138
Приложение 7	147
Приложение 8	151
Приложение 9	155
Приложение 10	158

Порядок выполнения лабораторных работ

Основными целями лабораторного практикума являются экспериментальное подтверждение основных положений теоретического курса, приобретение навыков в проведении экспериментальных исследований. Для выполнения лабораторных работ используются программно-аппаратные средства компании National Instruments: среда графического программирования LabVIEW, лабораторная станция NI ELVIS, пакет моделирования электронных схем Multisim.

С помощью среды графического программирования LabVIEW созданы виртуальные приборы, которые отображаются на экране монитора персонального компьютера (ПК) в виде интерактивных панелей управления (ИПУ), их внешний вид и выполняемые функции схожи с внешним видом и функциями реальных измерительных приборов. Среда LabVIEW содержит обширный набор инструментальных средств для сбора, анализа, представления и хранения данных и используется в лабораторном практикуме как для математического моделирования радиотехнических сигналов, так и для измерения и обработки реальных физических величин.

Лабораторная станция NI ELVIS (National Instruments Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite) состоит из настольной рабочей станции с реальными устройствами: источниками питания, функциональным генератором, макетной платой — и комплекта виртуальных измерительных приборов, разработанных в LabVIEW. На макетную плату устанавливается собранная заранее реальная исследуемая цепь, а измерение всех электрических величин в этой цепи производится с помощью виртуальных приборов. Предварительно измеряемые величины подаются на плату сбора данных, с помощью которой

переводятся в цифровую форму, это позволяет обрабатывать их цифровыми методами с помощью персонального компьютера и отображать их параметры на экране монитора. Для проведения некоторых исследований к макетной плате дополнительно подключаются реальные измерительные приборы.

Программный пакет Multisim представляет собой интерактивный эмулятор электронных схем, в состав которого входит редактор схем и библиотека элементов и измерительных приборов. Данный пакет позволяет смоделировать работу электрической цепи и выполнить ее анализ на ПК.

Выполнение каждой лабораторной работы состоит из трех этапов:

- 1) домашней подготовки;
- 2) проведения экспериментальных исследований в лаборатории;
- 3) обработки результатов, составления и сдачи отчета.

Во время домашней подготовки необходимо:

- 1) ознакомиться с описанием лабораторной работы и аппаратуры, используемой при выполнении;
- 2) изучить соответствующие теоретические разделы курса;
- 3) выполнить требуемые в домашнем задании расчеты, составить по их результатам таблицы и графики (расчеты выполняются на отдельных листах бумаги и вкладываются в отчет при его составлении), расчеты выполняются в одном экземпляре на бригаду;
- 4) ознакомиться с лабораторным заданием, продумать план и методику проведения экспериментальных исследований.

Лабораторные работы выполняются бригадами по 2 человека в часы, предусмотренные расписанием.

Выполнению каждой работы предшествует проверка подготовленности студента. Преподавателю предоставляются полностью оформленные результаты расчетов (один расчет на бригаду) и отчет о предыдущей работе, затем проводится проверка

теоретической подготовленности каждого студента в форме коллоквиума, собеседования либо тестирования.

При удовлетворительной подготовке (правильно выполненные расчеты и достаточная теоретическая подготовка) студенты допускаются до выполнения экспериментальной части.

В ходе выполнения экспериментальных исследований студентами составляется черновик (один на бригаду), в который заносятся все полученные в эксперименте данные, заполняются необходимые таблицы, зарисовываются временные диаграммы (или делаются скриншоты), выполняются требуемые расчеты. Допускается составление черновика в электронном виде на компьютере. Работа считается оконченной после просмотра и утверждения преподавателем черновика результатов экспериментальных исследований.

Отчет о лабораторной работе оформляется студентами один на бригаду на листах формата А4 в рукописном или печатном виде. На титульном листе обязательно указывается название и номер работы, фамилия и инициалы преподавателя, фамилии и инициалы студентов, выполнивших работу, номер группы. Отчет должен содержать следующие пункты:

- 1) цель работы;
- 2) схему или схемы исследуемых цепей;
- 3) результаты расчетов;
- 4) результаты эксперимента в виде числовых данных, таблиц, временных диаграмм;
- 5) графики и расчеты, построенные и выполненные по результатам эксперимента;
- 6) выводы, в которых кратко описывается, что сделано в работе, какие получены результаты, зависимости, приводится анализ того, чем они объясняются; подтверждает ли эксперимент теорию; чем объясняются возможные расхождения.

Сдача отчета состоит в просмотре отчета преподавателем и собеседовании с каждым студентом по тематике лабораторной работы.

Лабораторная работа № 1

Спектральный анализ периодических сигналов

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — исследование возможности формирования периодических сигналов с использованием их спектрального разложения. Изучение влияния ограничения числа гармонических составляющих на точность представления сигнала. Ознакомление со спектральным методом анализа прохождения сигналов через линейную электрическую цепь.

1.1. Теоретическая часть

Периодические сигналы и ряды Фурье

Сигналом называется процесс изменения во времени физического состояния какого-либо объекта, служащий для отображения, регистрации и передачи информации. Математической моделью сигнала может быть функция времени, например $s(t)$. Типичными для радиотехники сигналами являются напряжение $u(t)$ и ток $i(t)$. Если математическая модель сигнала позволяет предсказать его точное значение в любой момент времени, такой сигнал называется детерминированным. В радиотехнике часто рассматриваются сигналы, существующие в пределах конечного отрезка времени, например $s(t) \neq 0$ при $0 \leq t \leq \tau_{\text{и}}$, где $\tau_{\text{и}}$ — длительность импульса, такие сигналы называются импульсными. Если значения сигнала повторяются через равные промежутки T на всей оси времени t , такой сигнал называется периодическим (рис. 1.1).

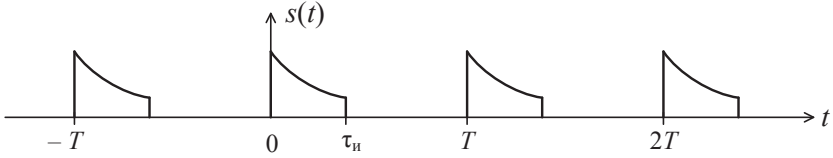


Рис. 1.1. Периодический импульсный сигнал

Для математической модели периодического сигнала выполняется условие

$$s(t) = s(t \pm nT),$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$; T — период повторения сигнала.

Спектральным разложением называется представление сигнала в виде суммы гармонических колебаний с различными частотами. Как известно из математики, произвольная периодическая функция $s(t)$, удовлетворяющая условию Дирихле, т. е. на отрезке времени равном периоду T имеющая конечное число экстремумов и конечное число разрывов первого рода, может быть представлена тригонометрическим рядом Фурье

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t), \quad (1.1)$$

где a_0, a_n, b_n — коэффициенты тригонометрического ряда Фурье, которые находятся по формулам

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) dt, \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \cos n\omega_1 t dt, \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \sin n\omega_1 t dt, \end{aligned} \quad (1.2)$$

ω_1 — основная частота последовательности или частота первой гармоники $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$.

Если сигнал четный, т. е. если $s(-t) = s(t)$, формулы (1.2) приводятся к виду

$$a_0 = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} s(t) dt,$$

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} s(t) \cos n\omega_1 t dt,$$

$$b_n = 0.$$

А если сигнал нечетный, т. е. если $s(-t) = -s(t)$, то

$$a_0 = 0,$$

$$a_n = 0,$$

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} s(t) \sin n\omega_1 t dt.$$

Выражение (1.1) для тригонометрического ряда Фурье можно записать в другой форме:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t - \varphi_n), \quad (1.3)$$

где

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \varphi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}.$$

Таким образом, периодический сигнал $s(t)$ может быть представлен в виде бесконечной суммы постоянной составляющей $a_0/2$ и гармонических составляющих, называемых гармониками, с амплитудами A_n , начальными фазами φ_n и частотами $n\omega_1$ кратными основной частоте.

Совокупность коэффициентов $\left\{\frac{a_0}{2}, A_n\right\}$ образует дискретный амплитудный спектр (амплитудную спектральную диаграмму) периодического сигнала $s(t)$ на положительной полуоси частот $\omega \geq 0$, а совокупность коэффициентов $\{\varphi_n\}$ — дискретный фазовый спектр (фазовую спектральную диаграмму) сигнала также на положительной полуоси частот $\omega \geq 0$ (рис. 1.2).

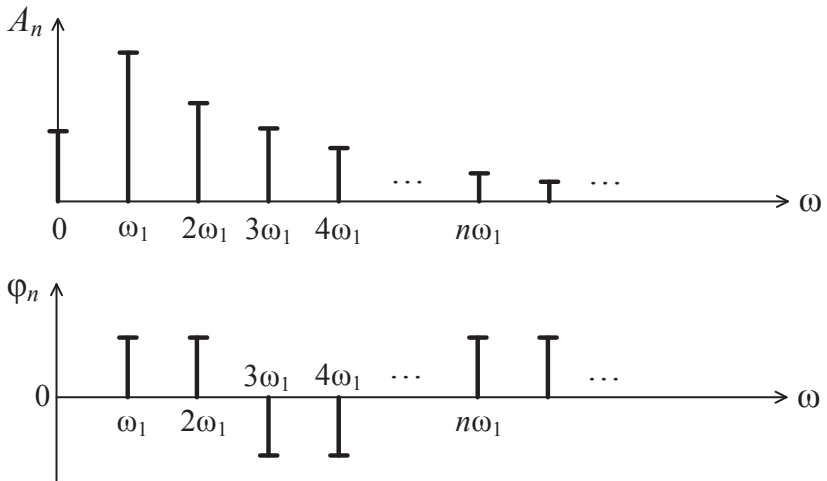


Рис. 1.2. Амплитудный и фазовый спектры периодического сигнала

Тригонометрический ряд Фурье (1.3) является физической моделью сигнала, т. к., просуммировав гармонические составляющие с частотами $n\omega_1$ с соответствующими амплитудами и начальными фазами, можно сформировать сигнал $s(t)$. Однако надо учитывать, что на практике при синтезе сигнала по его гармоникам можно вычислить только частичную сумму ряда Фурье, ограничившись числом гармоник равным N , при этом сформированный сигнал можно записать следующим образом:

$$\tilde{s}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N A_n \cos(n\omega_1 t - \varphi_n),$$

и в этом случае $s(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \tilde{s}(t)$. Кроме того, ограничение числа слагаемых приведет к появлению эффекта Гиббса из-за неравномерной сходимости ряда Фурье в окрестности точек разрыва функции $s(t)$, проявляющегося в наличии колебаний функции $\tilde{s}(t)$ в окрестности точек разрыва исходной функции $s(t)$, частота которых увеличивается с увеличением числа слагаемых N .

Основы спектрального метода

Ценность представления произвольного сигнала в виде суммы гармонических составляющих состоит в том, что гармонические колебания инвариантны относительно преобразований их линейными электрическими цепями, т. е. если на вход линейной цепи воздействует гармоническое колебание, то на выходе будет наблюдаться гармоническое колебание той же частоты, но с другой амплитудой и начальной фазой. Пусть на вход линейной цепи с комплексным коэффициентом передачи $K(j\omega)$ (рис. 1.3) подается периодический сигнал $s_{\text{вх}}(t) = s(t)$, представленный тригонометрическим рядом Фурье (1.3). Применяя к линейной цепи теорему о суперпозиции, а также используя определение комплексной частотной характеристики $K(j\omega) = \dot{S}_{\text{вых}} / \dot{S}_{\text{вх}}$, где $\dot{S}_{\text{вых}}$ и $\dot{S}_{\text{вх}}$ — комплексные амплитуды выходного и входного сигналов, и метод комплексных амплитуд, можно найти выходной сигнал

$$s_{\text{вых}}(t) = \frac{a_0}{2} K(0) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n K(n\omega_1) \cos[n\omega_1 t - \varphi_n + \psi(n\omega_1)],$$

где $K(0)$ — значение $K(j\omega)$ при $\omega = 0$; $K(n\omega_1)$ — значение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) цепи на частоте $\omega = n\omega_1$, $K(n\omega_1) = |K(jn\omega_1)|$; $\psi(n\omega_1)$ — значение фазочастотной характеристики (ФЧХ) на частоте $\omega = n\omega_1$, $\psi(n\omega_1) = \arg K(jn\omega_1)$.

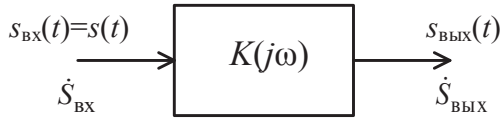


Рис. 1.3. Воздействие сигнала на линейную электрическую цепь

Таким образом, амплитуды и начальные фазы гармонических составляющих выходного сигнала $A_{n\text{ВЫХ}}$ и $\varphi_{n\text{ВЫХ}}$ связаны с амплитудами и начальными фазами входного сигнала A_n и φ_n

$$A_{n\text{ВЫХ}} = A_n K(\omega_n), \quad -\varphi_{n\text{ВЫХ}} = -\varphi_n + \psi(\omega_n),$$

где ω_n — частота n -й гармонической составляющей. Описанные свойства лежат в основе спектрального метода анализа прохождения сигналов через линейные электрические цепи [1], [2].

Амплитудная модуляция

Сигналы, поступающие от источника сообщений, как правило, низкочастотные, т. е. их спектр сосредоточен в широкой полосе частот от 0 до ω_b , где ω_b — верхняя частота. Для передачи таких сигналов в какой-либо среде, например по радиоканалу с помощью электромагнитных волн, их спектр необходимо перенести в область высоких частот. Эта задача решается с помощью модуляции, т. е. изменения какого-либо параметра: амплитуды, частоты или начальной фазы высокочастотного несущего колебания по закону передаваемого сообщения. Наиболее простой является амплитудная модуляция (АМ). Математическая модель АМ-сигнала

$$s_{\text{АМ}}(t) = U_m(t) \cos(\omega t + \varphi), \quad (1.4)$$

где $U_m(t)$ — амплитуда, называемая огибающей, изменяющаяся во времени по закону передаваемого сообщения; ω и φ — частота и начальная фаза несущего колебания соответственно.

$$U_m(t) = U_m [1 + Ms(t)], \quad (1.5)$$

где U_m — амплитуда несущего колебания в отсутствие модуляции; M — коэффициент модуляции, принимающий значения от 0 до 1 и часто выражаемый в процентах ($M, \% = M \cdot 100$); $s(t)$ — передаваемое низкочастотное сообщение.

Для изучения процессов, происходящих при амплитудной модуляции, удобно рассмотреть однотоновый АМ-сигнал, когда передаваемое сообщение является гармоническим колебанием с частотой Ω , при этом $\Omega \ll \omega$. Для упрощения начальные фазы несущего и модулирующего колебаний можно принять равными нулю. В этом случае

$$s_{AM}(t) = U_m [1 + M \cos(\Omega t)] \cos(\omega t). \quad (1.6)$$

График однотонового АМ-сигнала показан на рис. 1.4. Чтобы выполнить спектральное разложение такого сигнала, достаточно раскрыть скобки в выражении (1.6) и применить тригонометрическую формулу

$$\cos x \cos y = \frac{1}{2} [\cos(x + y) + \cos(x - y)]. \quad (1.7)$$

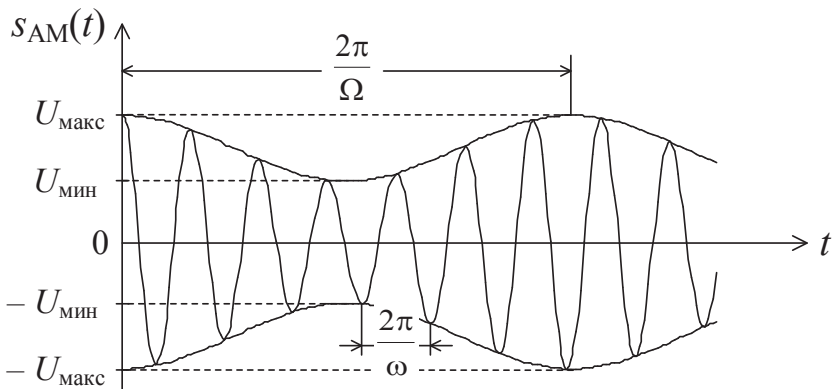


Рис. 1.4. Однотоновый АМ-сигнал

В таком случае

$$s_{\text{AM}}(t) = U_m \cos(\omega t) + \frac{U_m M}{2} \cos[(\omega + \Omega)t] + \frac{U_m M}{2} \cos[(\omega - \Omega)t].$$

Итак, однотоновый АМ-сигнал содержит в своем спектре несущее колебание с частотой ω и амплитудой U_m , а также верхнее и нижнее боковые колебания с частотами $\omega + \Omega$, $\omega - \Omega$ с одинаковыми амплитудами $U_m M/2$. Амплитудный спектр однотонового АМ-сигнала показан на рис. 1.5.

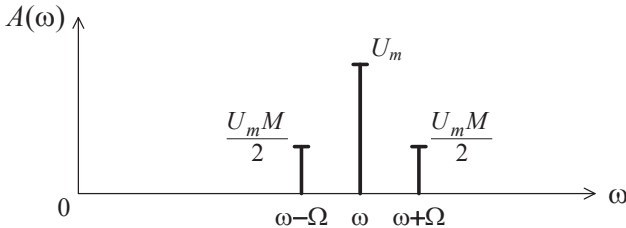


Рис. 1.5. Амплитудный спектр однотонового АМ-сигнала

1.2. Домашнее задание

Данные для выполнения задания приведены в прил. 1. Пример выполнения расчетов в программе Mathcad приведен в прил. 2.

1. Для периодической последовательности прямоугольных импульсов (рис. 1.6) рассчитайте коэффициенты тригонометрического ряда Фурье a_0 , a_n , b_n . Рассчитайте амплитуды A_n и начальные фазы φ_n гармоник. Постройте амплитудную и фазовую спектральные диаграммы. Расчет и построение выполните для первых восьми гармоник.

Рассчитайте ослабление в децибелах амплитуд гармоник по отношению к амплитуде импульсов по формуле

$$A_{dB\ n} = 20 \log \frac{U_m}{A_n}. \quad (1.8)$$

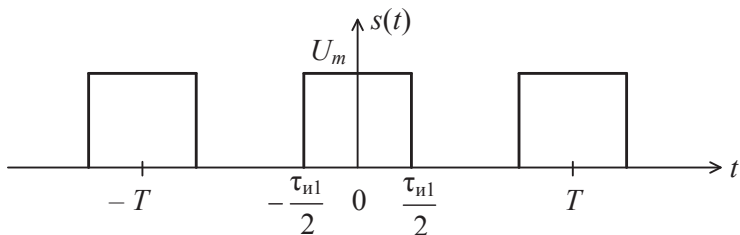


Рис. 1.6. Периодическая последовательность прямоугольных импульсов

По результатам расчетов составьте таблицу

n	1	2	3	4	5	6	7	8
A_n , В								
A_{dBn} , дБ								
φ_n , град								

2. Рассчитайте и постройте амплитудную и фазовую спектральные диаграммы (для постоянной составляющей и первых восьми гармоник) сигнала на выходе RC -цепи (рис. 1.7) с комплексным коэффициентом передачи

$$K(j\omega) = \frac{1}{1 + j(\omega / \omega_{cp})} \left(\text{частота среза } \omega_{cp} = \frac{1}{RC} \right)$$

для заданного значения ω_{cp} (см. прил. 1, $\omega_b = 2\pi/\tau_{и1}$) при подаче на ее вход периодической последовательности прямоугольных импульсов с параметрами, заданными в п. 1.

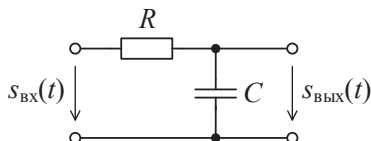


Рис. 1.7. RC -цепь

Рассчитайте ослабление гармоник на выходе RC -цепи по формуле (1.8). По результатам расчетов составьте таблицу, форма которой приведена в п. 1.

3. Выполните расчеты, аналогичные п. 1, для периодической последовательности треугольных импульсов (рис. 1.8).

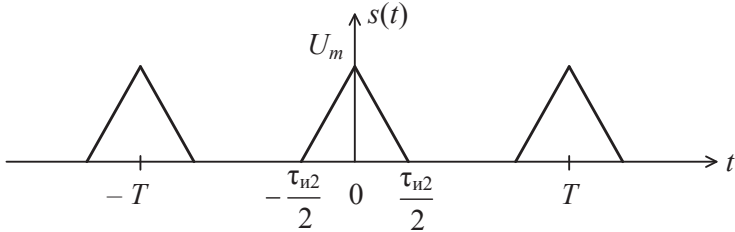


Рис. 1.8. Периодическая последовательность треугольных импульсов

Математическая модель одиночного треугольного импульса на отрезке $[-\tau_n/2; \tau_n/2]$ описывается формулой

$$s(t) = \begin{cases} \frac{2U_m}{\tau_n} \left(t + \frac{\tau_n}{2} \right), & -\frac{\tau_n}{2} \leq t < 0; \\ \frac{2U_m}{\tau_n} \left(\frac{\tau_n}{2} - t \right), & 0 \leq t \leq \frac{\tau_n}{2}. \end{cases}$$

4. Рассчитайте и постройте амплитудную и фазовую спектральные диаграммы для периодической последовательности треугольных импульсов, смещенных вправо на величину t_3 , (рис. 1.9).

При этом воспользуйтесь результатами п. 3 и следующим соотношением:

$$\begin{aligned} s_{\text{см}}(t) &= s(t - t_3) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos[n\omega_1(t - t_3) - \varphi_n] = \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos[n\omega_1 t - \varphi_n - n\omega_1 t_3]. \end{aligned}$$

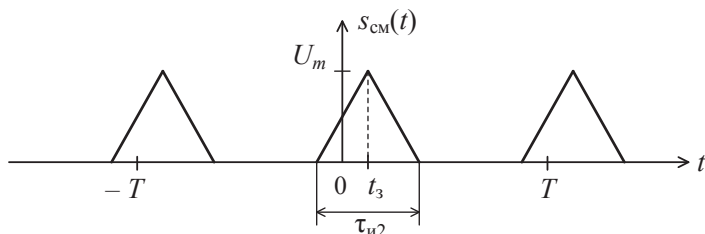


Рис. 1.9. Смещенная периодическая последовательность треугольных импульсов

Таким образом, при смещении сигнала по оси времени его амплитудный спектр не меняется, а фазовый приобретает добавку

$$\Delta\varphi_n = n\omega_1 t_3 = n \frac{2\pi}{T} t_3.$$

По результатам расчетов составьте таблицу для начальных фаз гармоник смещенного сигнала $\theta_{cm n} = -\varphi_n - \Delta\varphi_n$:

n	1	2	3	4	5	6	7	8
$\theta_{cm n}$, град								

5. Выполните расчеты, аналогичные п. 1, для периодической последовательности пилообразных импульсов (рис. 1.10), вид сигнала выберите в соответствии с номером стенда.

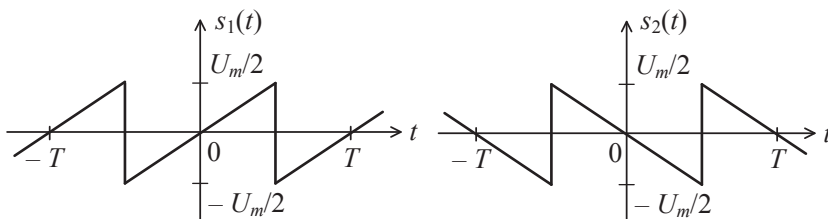


Рис. 1.10. Периодические последовательности пилообразных импульсов

Математические модели пилообразных импульсов на отрезке $[-T/2; T/2]$ описываются формулами

$$s_1(t) = \frac{U_m}{T}t, \quad s_2(t) = -\frac{U_m}{T}t, \quad t \in [-T/2; T/2].$$



6. Для однотонового АМ-сигнала, выбрав в качестве несущей частоты $\omega = 7\omega_1$, а в качестве боковых $\omega = 6\omega_1$ и $\omega = 8\omega_1$, рассчитайте и постройте амплитудную спектральную диаграмму. Рассчитайте ослабление гармонических составляющих спектра относительно заданной амплитуды U_m по формуле (1.8), приведенной в п. 1. По результатам расчетов составьте таблицу:

n	6	7	8
A_n , В			
A_{dBn} , дБ			

7. Ознакомьтесь с описанием лабораторного стенда и экспериментальным заданием.

1.3. Описание лабораторного стенда

Лабораторная работа выполняется на виртуальном лабораторном стенде, который позволяет выполнить синтез периодического сигнала по восьми гармоникам без учета постоянной составляющей. ИПУ стенда показана на рис. 1.11.

Над ИПУ расположены строка команд меню и панель инструментов, на которой находятся кнопки управления, среди них  — кнопка запуска виртуального стенда и  — кнопка остановки. На самой ИПУ расположены аттенюаторы **A1–A8**, позволяющие задать ослабление гармоник в пределах от 0 до 60 дБ с шагом 1 дБ относительно амплитуды, установленной в поле ввода-вывода **Амплитуда, В**. Под аттенюаторами расположены фазовращатели **φ1–φ8**, задающие началь-

ные фазы гармоник в пределах от -360 до 360 градусов с шагом 5 градусов. Начальные фазы всех гармоник можно дополнительно изменить на 90 или на -90 градусов с помощью группы кнопок **Δφ, град**. В нижней части ИПУ расположен график, на котором отображается сигнал, выбираемый в выпадающем списке **Сигнал**. На график можно вывести гармоники с первой по восьмую либо их сумму. Также над графиком расположены элементы управления отображением: кнопки **Инверсия цвета**, **Сетка** и регуляторы масштабов по осям. Подробнее основные элементы ИПУ виртуальных приборов описаны в прил. 3.

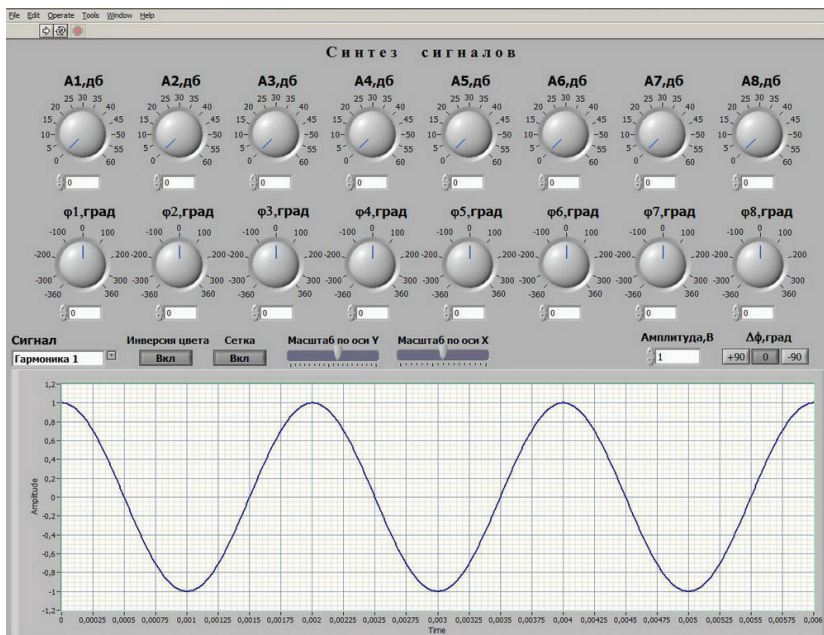




Рис. 1.11. ИПУ виртуального лабораторного стенда «Синтез сигналов»

1.4. Экспериментальное задание

1. Подготовка к исследованиям. Включите питание компьютера, дождитесь загрузки операционной системы. Запустите виртуальный лабораторный стенд. Для этого откройте исполняемый файл «sintez.exe» из папки «Синтез сигналов/sintez», дважды щелкнув по нему левой клавишей мыши. Стенд должен завестись автоматически, при этом кнопка запуска будет недоступной и будет иметь вид ; иначе нажмите кнопку  на панели инструментов.

2. Синтез сигналов по спектральным составляющим.

2.1. Синтез прямоугольных импульсов. В поле ввода-вывода **Амплитуда, В** на ИПУ стенда установите заданную амплитуду сигнала. С помощью аттенюаторов **A1–A8** установите ослабления гармоник для последовательности прямоугольных импульсов, рассчитанные в п. 1 домашнего задания, при этом значения округлите до ближайшего целого. Если какая-либо гармоника отсутствует в спектре, то для нее установите значение 60 дБ (соответствует ослаблению в 1000 раз). С помощью фазовращателей **φ1–φ8** установите соответствующие начальные фазы гармоник с точностью 5 градусов, при этом учтите знак «минус» в формуле (1.3) для ряда Фурье. Проверьте, что в группе кнопок **Δφ, град** нажата кнопка со значением 0. Проверьте по графику амплитуды и начальные фазы всех гармоник, выбирая в выпадающем списке **Сигнал** соответствующие значения. Выберите в выпадающем списке **Сигнал** значение **Сумма**, установите масштабы по осям таким образом, чтобы по вертикали сигнал занимал не менее половины графика, а по горизонтали наблюдалось 2–3 периода, при необходимости инвертируйте цвет графика с помощью кнопки **Инверсия цвета**. Убедитесь, что синтезируемый сигнал соответствует заданному, определите и запишите его параметры (амплитуду, период, длительность), скопируйте (<Alt>+<Print Screen>) и затем вставьте в файл (<Ctrl>+<V>) ИПУ стенда.

2.2. Синтез прямоугольных импульсов, прошедших через RC -цепь. Повторите исследования, аналогичные п. 2.1, для последовательности прямоугольных импульсов, прошедших RC -цепь, спектры которых были рассчитаны в п. 2 домашнего задания.

2.3. Синтез треугольных импульсов. Повторите исследования, аналогичные п. 2.1, для последовательности треугольных импульсов, спектры которых были рассчитаны в п. 3 домашнего задания.


2.4. Синтез треугольных импульсов, смещенных по оси времени. Измените начальные фазы гармоник для последовательности треугольных импульсов в соответствии с результатами расчетов п. 4 домашнего задания, определите и запишите величину смещения импульсов t_3 , скопируйте и вставьте в файл ИПУ стенда.


2.5. Синтез пилообразных импульсов. Повторите исследования, аналогичные п. 2.1, для последовательности пилообразных импульсов, спектры которых были рассчитаны в п. 5 домашнего задания.

2.6. Синтез АМ-сигнала. Повторите исследования, аналогичные п. 2.1, для АМ-сигнала, спектр которого был рассчитан в п. 6 домашнего задания, при этом начальные фазы несущего и боковых колебаний установите равными нулю. По графику синтезированного АМ-сигнала определите и запишите периоды несущего $T_{\text{нес}}$ и модулирующего $T_{\text{мод}}$ колебаний, максимальное $U_{\text{макс}}$ и минимальное $U_{\text{мин}}$ значения амплитуды несущего колебания, рассчитайте коэффициент модуляции по формуле

$$M = (U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}) / (U_{\text{макс}} + U_{\text{мин}}),$$

сравните его с заданным. Скопируйте и вставьте в файл ИПУ стенда.

3. Завершение исследований и выход из программы. Остановите виртуальный стенд кнопкой  на панели инструмен-

тов, затем закройте окно ИПУ, щелкнув левой клавишей мыши по кнопке  в правом верхнем углу.

1.5. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) исходные данные к работе — заданные графики сигналов, их параметры, схему *RC*-цепи;
- 3) результаты расчетов в виде таблиц и спектральных диаграмм;
- 4) результаты эксперимента — графики синтезированных сигналов (либо ИПУ стенда в полном виде, либо только график после обработки скриншота в графическом редакторе), параметры, которые были определены по экспериментальным графикам;
- 5) выводы, содержащие анализ результатов работы.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определение сигнала, математической модели сигнала.
2. Сформулируйте определения детерминированного сигнала, импульсного сигнала, периодического сигнала.
3. Что называется спектральным разложением сигнала?
4. Что такое тригонометрический ряд Фурье? Каким образом рассчитать коэффициенты тригонометрического ряда Фурье?
5. Как выполняется и какой вид имеет спектральное разложение периодического сигнала?
6. Что такое амплитудная и фазовая спектральные диаграммы периодического сигнала, какой они имеют вид?

7. К чему приведет ограничение числа слагаемых в тригонометрическом ряде Фурье?
8. Как влияет на амплитудный и фазовый спектры смещение сигнала по времени?
9. Как рассчитать сигнал на выходе линейной электрической цепи, если сигнал на входе представлен суммой гармонических колебаний?
10. Как выполнить спектральное разложение однотонового АМ-колебания? Какой вид имеет спектр АМ-колебания?

Лабораторная работа № 2

Прохождение сигналов с амплитудной модуляцией через частотно-избирательную цепь

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — экспериментальное исследование прохождения амплитудно-модулированных сигналов через частотно-избирательную цепь и изучение методов математического описания прохождения узкополосных сигналов через частотно-избирательные цепи.

2.1. Теоретическая часть

Амплитудная модуляция при сложном сигнале

Амплитудно-модулированные сигналы на примере однотонального АМ-колебания были рассмотрены в теоретической части лабораторной работы № 1 (см. с. 13). Если передаваемое сообщение $s(t)$ в формуле (1.5) будет сложным сигналом, который можно представить в виде суммы гармонических составляющих с различными частотами Ω_n , то АМ-сигнал следует записать в следующем виде:

$$s_{\text{АМ}}(t) = U_m \left[1 + \sum_{n=1}^N M_n \cos(\Omega_n t + \Phi_n) \right] \cos(\omega t), \quad (2.1)$$

где N — количество гармонических составляющих в спектре модулирующего колебания; M_n — *парциальные*, или *частичные*, коэффициенты модуляции; Ω_n — упорядоченная возрастающая последовательность частот, $\Omega_1 < \Omega_2 < \dots < \Omega_n$; Φ_n — на-

чальные фазы гармонических составляющих модулирующего сигнала. Начальная фаза несущего колебания принята равной нулю. Раскрыв скобки в выражении (2.1) и применив формулу произведения косинусов (1.7), можно определить спектральный состав такого АМ-колебания:

$$s_{AM}(t) = U_m \cos(\omega t) + \sum_{n=1}^N \frac{U_m M_n}{2} \cos[(\omega + \Omega_n)t + \Phi_n] + \sum_{n=1}^N \frac{U_m M_n}{2} \cos[(\omega - \Omega_n)t - \Phi_n]. \quad (2.2)$$

Таким образом, спектр АМ-колебания при сложном модулирующем сигнале содержит несущее колебание с частотой ω и амплитудой U_m и группу верхних и нижних боковых колебаний с частотами $\omega \pm \Omega_n$ с амплитудами $U_m M_n/2$ (рис. 2.1).

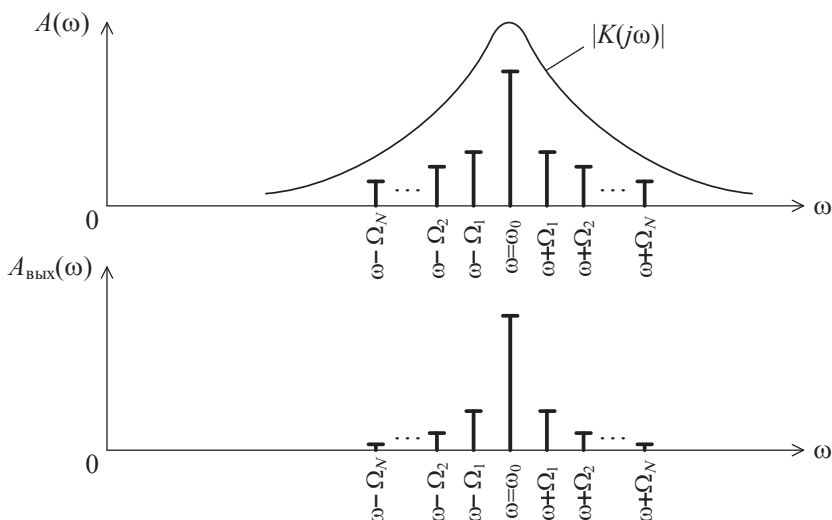


Рис. 2.1. Преобразование спектра АМ-сигнала при прохождении через резонансный усилитель

Резонансный усилитель в режиме малого сигнала

Частотно-избирательной называется линейная электрическая цепь, АЧХ которой имеет ярко выраженный максимум на частоте $\omega_0 \neq 0$. Примером такой цепи является резонансный усилитель, работающий при малых входных сигналах (рис. 2.2).

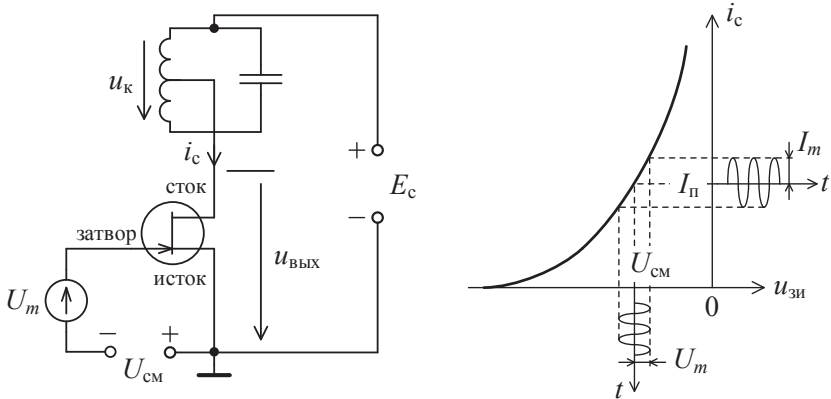


Рис. 2.2. Резонансный усилитель на полеовом транзисторе в режиме малого сигнала

Постоянное напряжение смещения $U_{см}$ задает рабочую точку на характеристике транзистора. Если к входу усилителя приложено гармоническое напряжение с амплитудой U_m и частотой ω , то напряжение между затвором и истоком транзистора

$$u_{зи}(t) = U_{см} + U_m \cos \omega t.$$

При малых амплитудах U_m нелинейностью сток-затворной характеристики транзистора — зависимости тока стока i_c от напряжения между затвором и истоком $u_{зи}$ — можно пренебречь, в этом случае ток стока

$$i_c(t) = I_{п} + I_m \cos \omega t,$$

где $I_{\text{п}}$ — ток покоя; I_m — амплитуда переменной составляющей тока, определяемая по соотношению

$$I_m = S_{\text{диф}} U_m.$$

Здесь $S_{\text{диф}}$ — дифференциальная крутизна характеристики транзистора в рабочей точке,

$$S_{\text{диф}} = \left. \frac{di_c}{du_{\text{зи}}} \right|_{u_{\text{зи}} = U_{\text{см}}}. \quad (2.3)$$

Нагрузкой транзистора служит колебательный контур с комплексным сопротивлением

$$Z_{\text{к}}(j\omega) \approx \frac{R_{\text{oe}}}{1 + j\tau_{\text{к}}(\omega - \omega_0)},$$

где R_{oe} — резонансное сопротивление контура; $\tau_{\text{к}}$ — постоянная времени контура; ω_0 — резонансная частота. Выходное напряжение усилителя

$$u_{\text{вых}}(t) = E_c - u_{\text{к}}(t) = E_c - Z_{\text{к}}(\omega) I_m \cos[\omega t + \psi_{\text{к}}(\omega)],$$

где E_c — ЭДС стокового питания; $u_{\text{к}}(t)$ — напряжение на контуре; $Z_{\text{к}}(\omega)$ и $\psi_{\text{к}}(\omega)$ — АЧХ и ФЧХ комплексного сопротивления контура соответственно, $Z_{\text{к}}(\omega) = |Z_{\text{к}}(j\omega)|$, $\psi_{\text{к}}(\omega) = \arg Z_{\text{к}}(j\omega)$.

Комплексная амплитуда выходного напряжения усилителя

$$\dot{U}_{m \text{ вых}} = -Z_{\text{к}}(j\omega) \dot{I}_m = -Z_{\text{к}}(j\omega) S_{\text{диф}} \dot{U}_m,$$

где \dot{I}_m — комплексная амплитуда тока стока; \dot{U}_m — комплексная амплитуда входного напряжения.

Таким образом, комплексный коэффициент передачи по напряжению усилителя

$$K(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m \text{ вых}}}{\dot{U}_m} = -Z_{\text{к}}(j\omega) S_{\text{диф}} = \frac{-K_0}{1 + j\tau_{\text{к}}(\omega - \omega_0)}, \quad (2.4)$$

где K_0 — коэффициент усиления на резонансной частоте,

$$K_0 = S_{\text{диф}} R_{oe}. \quad (2.5)$$

АЧХ комплексного коэффициента передачи $|K(j\omega)|$ показана на рис. 2.1.

Если на вход резонансного усилителя подается АМ-сигнал, спектр которого описывается выражением (2.2) с несущей частотой ω , равной резонансной частоте контура ω_0 , то, как видно из рис. 2.1, коэффициент передачи $|K(j\omega)|$ будет различным для разных спектральных составляющих. Значение $|K(j\omega)|$ будет максимальным для несущего колебания с частотой ω и будет уменьшаться для боковых колебаний с частотами $\omega \pm \Omega_n$. В результате этого боковые составляющие АМ-сигнала на выходе усилителя будут подавлены относительно несущей, что приведет к уменьшению коэффициентов модуляции M_n . Кроме того, нелинейность ФЧХ $\arg K(j\omega)$ может привести к фазовым искажениям, что в сумме вызовет искажение формы огибающей АМ-сигнала на выходе усилителя.

Метод комплексной огибающей

Для аналитического описания прохождения АМ-сигнала через частотно-избирательную цепь удобно воспользоваться методом комплексной огибающей, суть которого состоит в следующем. АМ-сигнал относится к узкополосным сигналам, спектр которых занимает узкую полосу частот $\Delta\omega \ll \omega$ в окрестности некоторой частоты $\omega > 0$. Математическая модель таких сигналов в общем случае записывается следующим образом:

$$s(t) = U_s(t) \cos[\omega t + \varphi_s(t)],$$

где $U_s(t)$ — физическая огибающая, или огибающая узкополосного сигнала; $\varphi_s(t)$ — его начальная фаза. $U_s(t)$ и $\varphi_s(t)$ — медленные функции по сравнению с $\cos(\omega t)$.

Комплексной огибающей узкополосного сигнала называется комплексное число (функция)

$$\tilde{U}_s(t) = U_s(t)e^{j\varphi_s(t)}.$$

Тогда по аналогии с метод комплексных амплитуд из курса основ теории цепей можно записать

$$s(t) = \operatorname{Re}\{\tilde{U}_s(t)e^{j\omega t}\}, \quad (2.6)$$

где $e^{j\omega t}$ — оператор вращения. Поскольку информация о передаваемом сообщении содержится в функциях $U_s(t)$ и $\varphi_s(t)$, а частота ω служит для переноса спектра сообщения в область высоких частот, то удобно рассмотреть прохождение комплексной огибающей через низкочастотный (НЧ) эквивалент частотно-избирательной цепи и затем восстановить сигнал на выходе, используя соотношение (2.6). Это позволит существенно упростить анализ. НЧ-эквивалент частотно-избирательной цепи получается путем сдвига ее частотной характеристики в окрестность нулевой частоты при замене переменной $\omega = \omega_0 + \Omega$, где Ω — низкая частота.

Таким образом, комплексный коэффициент передачи НЧ-эквивалента резонансного усилителя с частотной характеристикой (2.4) будет иметь вид

$$K_{\text{НЧ}}(j\Omega) = K[j(\omega_0 + \Omega)] = \frac{-K_0}{1 + j\tau_{\kappa}\Omega}. \quad (2.7)$$

Пусть на вход резонансного усилителя воздействует однотональный АМ-сигнал (1.6). Комплексная огибающая этого сигнала при выборе несущей частоты ω в качестве опорной совпадающей с резонансной частотой контура ω_0 будет

$$\tilde{U}_s(t) = U_m[1 + M \cos \Omega t] = U_m + U_m M \cos \Omega t. \quad (2.8)$$

Для анализа прохождения комплексной огибающей через НЧ-эквивалент цепи могут быть использованы любые извест-

ные методы расчета, например метод комплексных амплитуд. Если амплитуда сигнала U_m мала, то резонансный усилитель можно считать линейным и можно применить теорему о суперпозиции, т. е. можно рассмотреть прохождение составляющих в формуле (2.8) через цепь независимо, просуммировав их на выходе. Таким образом, используя определение комплексного коэффициента передачи, комплексную огибающую сигнала на выходе НЧ-эквивалента можно записать

$$\tilde{U}_{s \text{ Вых}}(t) = U_m K_{\text{НЧ}}(0) + U_m M K_{\text{НЧ}}(\Omega) \cos[\Omega t + \psi_{\text{НЧ}}(\Omega)],$$

где $K_{\text{НЧ}}(\Omega)$ и $\psi_{\text{НЧ}}(\Omega)$ — АЧХ и ФЧХ НЧ-эквивалента соответственно, $K_{\text{НЧ}}(\Omega) = |K_{\text{НЧ}}(j\Omega)|$, $\psi_{\text{НЧ}}(\Omega) = \arg K_{\text{НЧ}}(j\Omega)$.

Используя выражение (2.7), вычисляя его модуль и аргумент, получаем

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{s \text{ Вых}}(t) &= -U_m K_0 - \frac{U_m M K_0}{\sqrt{1 + \tau_k^2 \Omega^2}} \cos(\Omega t - \arctg \tau_k \Omega) = \\ &= -U_m K_0 \left[1 + \frac{M}{\sqrt{1 + \tau_k^2 \Omega^2}} \cos(\Omega t - \arctg \tau_k \Omega) \right]. \end{aligned}$$

Используя (2.6), можно перейти от комплексной огибающей к сигналу на выходе резонансного усилителя

$$s_{\text{Вых}}(t) = -U_m K_0 \left[1 + \frac{M}{\sqrt{1 + \tau_k^2 \Omega^2}} \cos(\Omega t - \arctg \tau_k \Omega) \right] \cos(\omega t),$$

т. е. на выходе резонансного усилителя будет наблюдаться АМ-сигнал с той же несущей частотой ω , что и на входе, усиленный в K_0 раз, при этом выходной сигнал будет находиться в противофазе с входным за счет знака «минус». Коэффициент модуляции выходного сигнала будет уменьшен по отношению к входному

$$M_{\text{ввых}} = \frac{M}{\sqrt{1 + \tau_k^2 \Omega^2}}, \quad (2.9)$$

и огибающая будет запаздывать по фазе на величину

$$\Delta\psi = \arctg \tau_k \Omega. \quad (2.10)$$

При анализе прохождения узкополосных сигналов через избирательные цепи для нахождения комплексной огибающей выходного сигнала может применяться временной метод, в котором используется интеграл свертки, при этом

$$\tilde{U}_{\text{с ввых}}(t) = \int_0^t \tilde{U}_{\text{с}}(\tau) h_{\text{нч}}(t - \tau) d\tau,$$

где $h_{\text{нч}}(t)$ — импульсная характеристика НЧ-эквивалента, связанная с его комплексной частотной характеристикой обратным преобразованием Фурье,

$$h_{\text{нч}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{\text{нч}}(j\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega.$$

Временной метод позволяет рассчитать реакцию цепи на произвольное воздействие, начинающееся с момента времени $t = 0$.

2.2. Домашнее задание

Данные для выполнения задания приведены в прил. 4, а также в файле «Данные к стендам нелинейные цепи. xls». Пример выполнения расчетов некоторых пунктов в программе Mathcad приведен в прил. 5.

1. Изобразите принципиальную схему резонансного усилителя на полевом транзисторе.

2. Рассчитайте параметры колебательного контура:

- характеристическое сопротивление

$$\rho = 2\pi f_p L; \quad (2.11)$$

- резонансное сопротивление

$$R_{oe} = p^2 \rho Q; \quad (2.12)$$

- постоянную времени

$$\tau_k = \frac{2Q}{\omega_0} = \frac{2Q}{2\pi f_p} = \frac{Q}{\pi f_p},$$

где f_p — резонансная частота; L — индуктивность контура; p — коэффициент включения; Q — добротность.

3. Рассчитайте следующие характеристики однотонального АМ-сигнала на выходе резонансного усилителя:

- относительную зависимость коэффициента модуляции $M_{\text{вых}}/M$ от частоты модуляции $F_{\text{мод}}$, используя формулу (2.9);
- зависимость фазового сдвига огибающей $\Delta\psi$ от частоты модуляции $F_{\text{мод}}$, используя формулу (2.10);
- зависимость временного сдвига огибающей $\Delta t = \Delta\psi/\Omega$ от частоты модуляции $F_{\text{мод}}$.

При этом учтите, что $\Omega = 2\pi F_{\text{мод}}$. Частоту $F_{\text{мод}}$ изменяйте от 1 Гц приблизительно до 1500 Гц с таким шагом, чтобы рассчитать от 8 до 10 точек. Результаты расчетов занесите в приведенную ниже таблицу. Постройте графики зависимостей $M_{\text{вых}}/M(F_{\text{мод}})$ и $\Delta t(F_{\text{мод}})$.

$F_{\text{мод}}, \text{ Гц}$	1								1500
$M_{\text{вых}}/M$									
$\Delta\psi, \text{ рад}$									
$\Delta t, \text{ мс}$									

4. По сток-затворной характеристике транзистора $i_c(u_{\text{зи}})$ определите напряжение смещения $U_{\text{см}}$, соответствующее току покоя $I_{\text{п}} \approx 3 \text{ мА}$. В окрестности данной рабочей точки выберите

те приращение напряжения $\Delta u_{зи} \leq 0,5$ В и определите соответствующее ему приращение тока Δi_c , рассчитайте дифференциальную крутизну $S_{диф} = \Delta i_c / \Delta u_{зи}$. Рассчитайте коэффициент усиления резонансного усилителя K_0 , используя формулу (2.5).

5. Ознакомьтесь с описанием исследуемого модуля и методикой проведения эксперимента.

2.3. Описание исследуемого модуля

Лабораторная работа выполняется на базе лабораторной станции NI ELVIS, описание которой приведено в прил. 3, 6.

На макетную плату устанавливается модуль «Нелинейные цепи», используемый для выполнения лабораторных работ № 2–5. Принципиальная схема модуля показана на рис. 2.3. Модуль имеет в своем составе два устройства: диодный детектор, выполненный на диоде $VD1$, и усилитель, выполненный на полевом транзисторе $VT1$. Оба этих устройства являются нелинейными, но, как было описано выше, для малых входных сигналов усилитель будет линейным. Кроме того, модуль содержит вспомогательные устройства: повторители (\triangleright), сумматор (Σ), стабилизатор напряжения с ограничителем тока ($U, < I$).

На вход усилителя подается сумма напряжений — переменного напряжения с выхода функционального генератора $FUNC_OUT$, переменного напряжения с пользовательского разъема $BANANA\ A$ и постоянного отрицательного напряжения с выхода регулируемого источника $SUPPLY-$. На вход детектора подается через повторитель только напряжение с выхода функционального генератора $FUNC_OUT$.

Аналоговые входы и входы осциллографа на макетной плате соединены со следующими точками исследуемой схемы:

ACH0 — переменным напряжением на выходе усилителя;

ACH1 — выходным напряжением функционального генератора;

ACH2 — напряжением на пользовательском разъеме BANANA A;

CH A — напряжением на диоде;

CH B — напряжением на нагрузке диодного детектора.

Это позволяет при работе с осциллографом производить выбор источника сигнала программно, сводя к минимуму коммутации на печатной плате модуля.

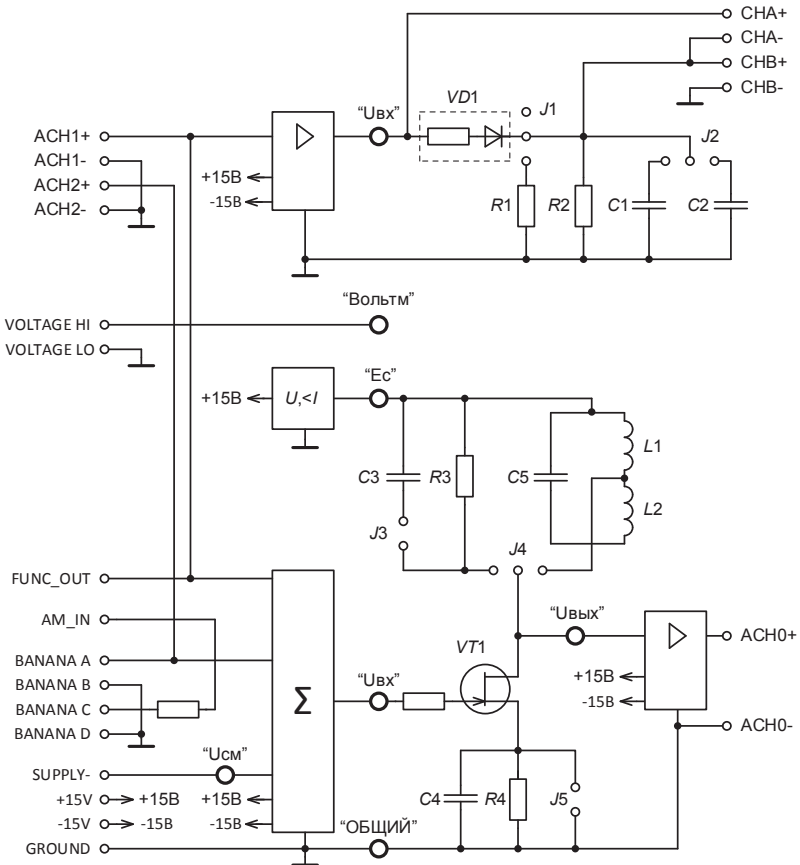


Рис. 2.3. Упрощенная принципиальная схема модуля «Нелинейные цепи»

Сборка необходимой схемы для исследования производится с помощью специальных перемычек — джамперов $J1-J5$, устанавливаемых в соответствующие позиции согласно маркировке на печатной плате.

Кроме того, модуль имеет контрольные гнезда: «U_см», «U_вх» (отдельно для детектора и для усилителя), «E_с», «U_вых» и гнездо «ОБЩИЙ», соединенное с общей цепью «заземление», — предназначенные для подключения измерительных приборов. Гнездо «Вольтм» модуля соединено с входом «VOLTAGE HI» цифрового мультиметра, при этом отрицательный вход «VOLTAGE LO» соединен с общей цепью. Таким образом, цифровой мультиметр позволяет измерять напряжения на контрольных гнездах относительно общей шины.

Питание схемы осуществляется от источников постоянного напряжения $+15\text{ В}$ и -15 В , при этом питание усилителя производится через дополнительный стабилизатор напряжения с ограничителем тока, ЭДС стокового питания $E_c = +(11,5...12)\text{ В}$.

2.4. Экспериментальное задание

1. Подготовка к исследованиям. Включите питание компьютера, дождитесь загрузки операционной системы и служебных программ.

Включите системное питание рабочей станции NI ELVIS выключателем на задней панели.

Установите переключатель «COMMUNICATIONS» на передней панели рабочей станции NI ELVIS в положение «NORMAL».

Включите программный режим управления регулируемыми источниками и функциональным генератором, установив переключатели «MANUAL» на передней панели рабочей станции в нижнее положение.

2. Проверка рабочей точки.

2.1. Соберите схему усилителя с апериодической нагрузкой:

- подключите исток транзистора $VT1$ к общей шине с помощью переключки $J5$;
- в цепь стока подключите резистор $R3$, используя переключку $J4$;
- конденсатор $C3$ отключите при помощи переключки $J3$.

2.2. Включите питание макетной платы выключателем «PROTOTYPING BOARD POWER» на передней панели рабочей станции, запустите программное обеспечение NI ELVIS, дождитесь инициализации системы, откройте следующие приборы:

- цифровой мультиметр Digital Multimeter (в ответ на сообщение «For maximum accuracy, use the DMM nulling...» нажмите **OK**);
- функциональный генератор Function Generator;
- регулируемые источники питания Variable Power Supplies.

Расположите ИПУ приборов на экране так, чтобы они не перекрывались.

2.3. Установите и проверьте рабочую точку, для этого:

- проверьте, что функциональный генератор выключен, при этом в поле частоты должно отображаться значение «OFF», в противном случае щелкните левой клавишей мыши по кнопке **On** на ИПУ генератора;
- соедините гнезда «Вольтм» и «U_{см}» исследуемого модуля; на ИПУ регулируемых источников установите отрицательное напряжение SUPPLY–, равное $U_{см}$, выбранное в п. 4 домашнего задания; измерьте напряжение мультиметром — отклонение от установленного значения не должно превышать $(\pm 5)\%$;
- измерьте мультиметром ЭДС стокового питания E_c и напряжение на стоке $U_{вых}$, соединяя гнездо «Вольтм» попеременно с гнездами «E_с» и «U_{вых}»; определите ток покоя $I_{п} = (E_c - U_{вых}) / R3$, где $R3 = 2 \text{ кОм}$; убедитесь, что

$I_{\pi} = 3 (\pm 0,2)$ мА, при несоответствии подкорректируйте $U_{\text{см}}$ в небольших пределах;

- по завершении данного пункта соедините гнезда «Вольтм» и «U_{см}» исследуемого модуля и закройте ИПУ цифрового мультиметра.

3. Проверка настройки контура в резонанс.

3.1. Соберите схему резонансного усилителя, для этого подключите в цепь стока транзистора $VT1$ колебательный контур $L1L2C5$ с помощью перемычки $J4$.

3.2. Включите функциональный генератор кнопкой **On** на ИПУ; в поле ввода-вывода **Frequency** введите с клавиатуры заданное значение частоты f_p , дождитесь, когда в поле частоты появится введенное значение (с некоторой погрешностью) и погаснет надпись «*TUNING*» (в выпадающем списке «Tuning Mode» должно быть установлено значение «UltraFine»); в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** введите с клавиатуры значение 0,1 В.

3.3. Откройте двухканальный осциллограф Oscilloscope, используя панель запуска приборов «ELVIS — Instrument Launcher», расположите ИПУ приборов на экране так, чтобы они не перекрывались. Установите следующие режимы работы осциллографа:

- включите отображение обоих каналов кнопками **Display ON/OFF** и включите режим измерения параметров сигнала в обоих каналах кнопками **MEAS**;
- на вход канала А подайте напряжение с выхода генератора, выбрав в выпадающем списке **Source** канала А значение «ACH1»; на вход канала В подайте выходное напряжение усилителя, выбрав в выпадающем списке **Source** канала В значение «ACH0»;
- установите длительность развертки **TIMEBASE** 10 мкс/дел; в качестве источника синхронизации **TRIGGER/Source** выберите «CH A»;

- установите масштабы по вертикали **VERTICAL/Scale** таким образом, чтобы каждый сигнал занимал от 1/3 до 1/2 экрана, при этом переместите сигнал канала А в верхнюю часть экрана, а сигнал канала В в нижнюю с помощью регуляторов «Position»; в выпадающем списке «Coupling» выберите значение «AC» для обоих каналов.

Убедитесь, что в канале А наблюдается гармонический сигнал с частотой f_p и амплитудой 0,1 В (± 10 %), а в канале В — гармонический сигнал с той же частотой с амплитудой, в 10–20 раз большей, чем в канале А. Для измерения параметров сигналов можно использовать измерители, расположенные под экраном осциллографа, при этом учтите, что RMS — действующее значение, а V_{p-p} — разность максимального и минимального значений, для гармонического напряжения амплитуда $U_m = \sqrt{2}RMS = V_{p-p} / 2$.

3.4. Вводя с клавиатуры в поле **Frequency** на ИПУ генератора значения $f_p, f_p + 100$ Гц, $f_p + 200$ Гц и т. д. до $f_p + (500...700)$ Гц, а затем $f_p - 100$ Гц, $f_p - 200$ Гц и т. д. до $f_p - (500...700)$ Гц, каждый раз измеряйте выходное напряжение усилителя $U_{вых}$ по параметру RMS в канале В осциллографа, снимите зависимость напряжения от частоты. По полученной зависимости $U_{вых}(f)$ определите значение f_{p0} , соответствующее максимуму напряжения (должно совпадать с f_p или незначительно отличаться). Введите с клавиатуры в поле **Frequency** на ИПУ генератора полученное значение f_{p0} .

3.5. Измерьте действующие значения входного $U_{RMS_{вх}}$ и выходного $U_{RMS_{вых}}$ напряжений усилителя (RMS в каналах А и В осциллографа соответственно); определите коэффициент усиления $K_0 = U_{RMS_{вых}} / U_{RMS_{вх}}$, сравните его с коэффициентом, рассчитанным в п. 4 домашнего задания.

4. Исследование прохождения АМ-сигнала.

4.1. Проверьте, что на ИПУ регулируемых источников установлено отрицательное напряжение **SUPPLY–**, равное $U_{см}$,

определенному в п. 2.3, на ИПУ генератора в поле **Frequency** установлена частота f_{p0} , определенная в п. 3.4, и в поле **Peak Amplitude** установлено значение 0,1 В.

4.2. Подключите источник модулирующего напряжения к макетной плате и установите необходимые параметры:

- соедините штекер «земля» (черный) кабеля внешнего генератора GFG-8215A* с гнездом «BANANA D» макетной платы, а сигнальный штекер (красный) кабеля генератора GFG-8215A с гнездом «BANANA C»;
- установите регуляторы генератора GFG-8215A — «DUTY», «CMOS», «OFFSET», «AMPL» в нажатое положение; регулятор «AMPL» поверните в среднее положение; включите питание генератора GFG-8215A кнопкой «POWER»; выберите тип сигнала «синусоида» нажатием соответствующей кнопки; установите частоту сигнала 150 Гц, для этого выберите соответствующий диапазон нажатием кнопки «100» и установите ручку «FREQUENCY» в положение «1,5»;
- установите длительность развертки на ИПУ осциллографа **TIMEBASE** 2 мс/дел., установите масштабы по вертикали **VERTICAL/Scale** таким образом, чтобы каждый сигнал занимал от 1/3 до 1/2 экрана, при этом расположите сигнал канала А в верхней части экрана, а сигнал канала В в нижней части с помощью регуляторов «Position»;
- убедитесь, что в канале А наблюдается АМ-сигнал с коэффициентом модуляции примерно 50 % (определение коэффициента модуляции по осциллограмме описано в подгл. 2.5 «Обработка результатов»), иначе установите данное значение при помощи ручки «AMPL» генератора GFG-8215A, а в канале В — АМ-сигнал примерно с таким же коэффициентом модуляции; определите по экрану

* Допускается применить в качестве источника модулирующего напряжения генератор SFG-2110 при самостоятельном изучении пользователем руководства по эксплуатации данного генератора.

осциллографа (или позже по скриншоту) период модулирующего колебания $T_{\text{мод}}$ и проверьте, что он соответствует установленной частоте модуляции $F_{\text{мод}} = 1/T_{\text{мод}}$: скопируйте (<Alt>+<Print Screen>) и вставьте в файл (<Ctrl>+<V>) ИПУ осциллографа.

4.3. Повторите исследования для частот модуляции 300, 600, 900, 1200, 1500 Гц. Для этого выберите соответствующий диапазон нажатием кнопки «1K» на генераторе GFG-8215A и установите ручку «FREQUENCY» соответственно в положения «0,3», «0,6», «0,9», «1,2», «1,5», при этом каждый раз выбирайте длительность развертки осциллографа **TIMEBASE** таким образом, чтобы на экране отображалось от 2 до 4 периодов модулирующего колебания; контролируйте соответствие периода $T_{\text{мод}}$ частоте $F_{\text{мод}}$. Скопируйте (<Alt>+<Print Screen>) и вставьте в файл (<Ctrl>+<V>) ИПУ осциллографа для каждого значения частоты.

4.4. Выполните исследование прохождения прямоугольных радиоимпульсов, для этого:

- установите частоту модуляции равную 150 Гц, выбрав соответствующий диапазон нажатием кнопки «100» на генераторе GFG-8215 и установив ручку «FREQUENCY» в положение «1,5»; выберите тип сигнала генератора GFG-8215A «прямоугольные импульсы» нажатием соответствующей кнопки;
- на ИПУ осциллографа установите длительность развертки **TIMEBASE** 2 мс/дел.; убедитесь, что в канале А наблюдается АМ-сигнал с прямоугольной огибающей; проверьте соответствие периода модуляции $T_{\text{мод}}$ установленной частоте $F_{\text{мод}}$;
- поверните ручку «AMPL» генератора GFG-8215A в такое положение, при котором коэффициент модуляции сигнала в канале А осциллографа будет близким к 100 %; при необходимости откорректируйте масштабы по вертикали **VERTICAL/Scale** таким образом, чтобы каждый сигнал занимал от 1/3 до 1/2 экрана;

- скопируйте (<Alt>+<Print Screen>) и вставьте в файл (<Ctrl>+<V>) ИПУ осциллографа.

5. Завершение исследований. После проверки результатов преподавателем выключите питание внешнего генератора GFG-8215A кнопкой «Power», закройте ИПУ всех приборов и панель запуска «ELVIS — Instrument Launcher», выключите питание макетной платы выключателем «PROTOTYPING BOARD POWER» на передней панели рабочей станции NI ELVIS, выключите системное питание рабочей станции выключателем на задней панели, завершите работу операционной системы и выключите компьютер.

2.5. Обработка результатов

По результатам пп. 4.2, 4.3 экспериментального задания по полученным скриншотам рассчитайте коэффициент модуляции входного M и выходного $M_{\text{вых}}$ напряжений усилителя, используя следующую формулу:

$$M = \frac{2U_{\text{макс}} - 2U_{\text{мин}}}{2U_{\text{макс}} + 2U_{\text{мин}}}, \quad (2.13)$$

где $2U_{\text{макс}}$ и $2U_{\text{мин}}$ — удвоенные максимальное и минимальное значения амплитуды (рис. 2.4) могут быть определены в делениях шкалы осциллографа или измерены линейкой в миллиметрах. Результаты занесите в приведенную ниже таблицу.

$F_{\text{мод}}, \text{Гц}$	150	300	600	900	1200	1500
M						
$M_{\text{вых}}$						
$M_{\text{вых}}/M$						
$\Delta t, \text{мс}$						

Рассчитайте отношение $M_{\text{вых}}/M$, результаты занесите в приведенную таблицу.

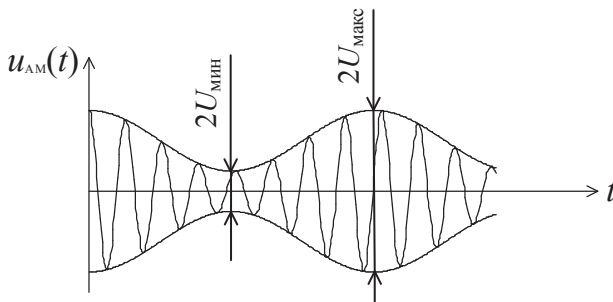


Рис. 2.4. Определение коэффициента модуляции по осциллограмме

По скриншотам, полученным в пп. 4.2, 4.3 экспериментального задания, определите время задержки Δt огибающей выходного сигнала относительно огибающей входного сигнала, результаты занесите в таблицу.

Постройте графики зависимостей $M_{\text{вых}}/M(F_{\text{мод}})$ и $\Delta t(F_{\text{мод}})$.

2.6. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) принципиальную схему резонансного усилителя;
- 3) результаты расчетов, выполненных при подготовке к работе, в виде числовых значений, таблицы и графиков;
- 4) результаты эксперимента — название пункта задания, числовые значения, полученные при выполнении измерений, осциллограммы сигналов в виде скриншотов ИПУ осциллографа;
- 5) результаты обработки экспериментальных данных — таблицу и графики;
- 6) выводы, содержащие анализ результатов работы.

Контрольные вопросы

1. Как записывается математическая модель АМ-сигнала при сложном модулирующем сигнале?
2. Как рассчитать и как выглядит графически спектр АМ-сигнала при сложном модулирующем сигнале?
3. Какая цепь называется частотно-избирательной? Приведите примеры частотно-избирательных цепей.
4. Изобразите принципиальную схему резонансного усилителя.
5. Объясните принцип работы резонансного усилителя при малом входном сигнале.
6. Объясните, как изменится огибающая АМ-колебания на выходе резонансного усилителя: а) при однотономальном АМ-колебании; б) при сложном модулирующем сигнале — и почему?
7. Объясните, как изменится спектр АМ-колебания на выходе резонансного усилителя: а) при однотономальном АМ-колебании; б) при сложном модулирующем сигнале — и почему?
8. Какой сигнал называется узкополосным? Как записывается математическая модель узкополосного сигнала? Приведите примеры узкополосных сигналов.
9. Что такое комплексная огибающая сигнала? Как она связана с математической моделью узкополосного сигнала?
10. В чем состоит метод комплексной огибающей анализа прохождения сигнала через линейные цепи? В каких случаях он применяется?
11. Как записать комплексную огибающую АМ-колебания: а) при однотономальном АМ-колебании; б) при сложном модулирующем сигнале?
12. Объясните, как, используя метод комплексной огибающей, рассчитать сигнал на выходе резонансного усилителя при подаче на вход однотономального АМ-сигнала с несущей частотой, равной резонансной частоте контура.

Лабораторная работа № 3

Исследование нелинейного резонансного усилителя

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — исследование преобразований гармонического сигнала нелинейным активным элементом и изучение методов математического описания этих преобразований. Оснакомление с принципами работы нелинейного резонансного усилителя и экспериментальное измерение его характеристик.

3.1. Теоретическая часть

Исследование нелинейных цепей представляет сложную задачу, поскольку процессы в таких цепях описываются нелинейным дифференциальным уравнением, которое может быть решено аналитически только при определенном виде нелинейности, поэтому решается приближенными методами.

Изучение процессов может быть упрощено, если представить нелинейную цепь в виде типового радиотехнического звена, показанного на рис. 3.1, состоящего из безынерционного нелинейного элемента и линейного фильтра. Такое представление позволяет рассматривать независимо преобразование сигнала нелинейным и линейным устройствами. Безынерционность означает мгновенное установление реакции вслед за изменением входного воздействия. Такие элементы полностью описываются их статическими характеристиками.

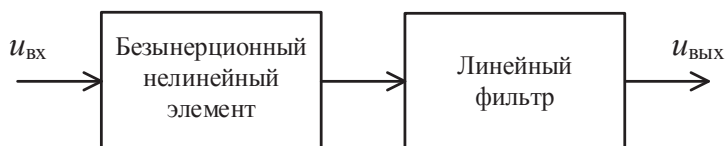


Рис. 3.1. Структурная схема типового радиотехнического звена

Принцип работы нелинейного резонансного усилителя

Нелинейный резонансный усилитель, принципиальная схема которого показана на рис. 3.2, является простейшим примером типового радиотехнического звена. Полевой транзистор представляет собой нелинейный элемент, его ток стока i_c нелинейным образом зависит от напряжения между затвором и истоком $u_{зи}$ (рис. 3.3). Колебательный контур, включенный в цепи стока, служит линейным фильтром. Подобные устройства применяются в технике радиопередающих устройств в качестве усилителей мощности, работающих при больших амплитудах входных напряжений, что делает необходимым учет нелинейности характеристики транзистора.

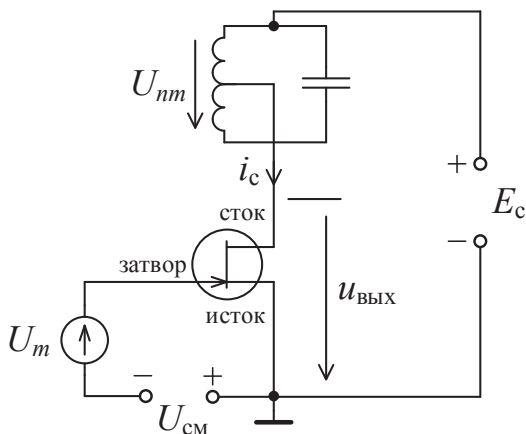


Рис. 3.2. Принципиальная схема нелинейного резонансного усилителя

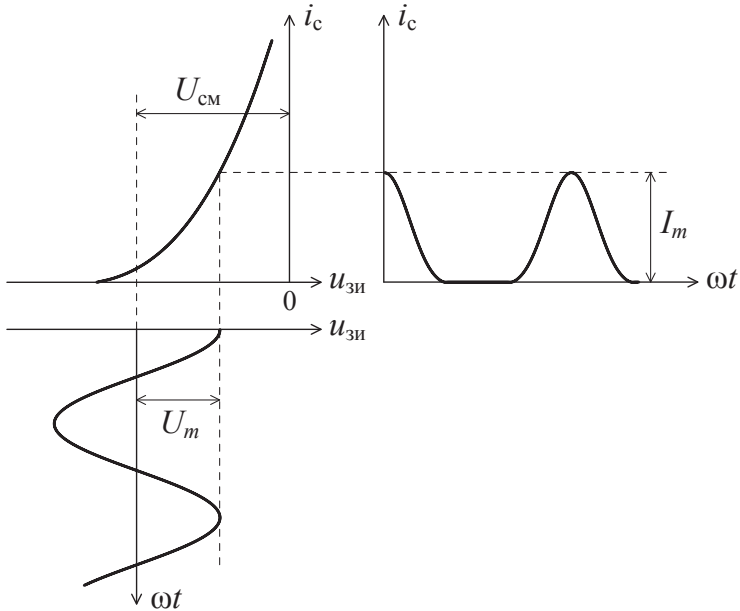


Рис. 3.3. Графики, поясняющие преобразование гармонического сигнала безынерционным нелинейным элементом

Если на вход нелинейного резонансного усилителя (рис. 3.2), т. е. между затвором и истоком транзистора, относительно напряжения смещения U_{CM} , определяющего рабочую точку, подать гармоническое напряжение с большой амплитудой U_m

$$u_{BX}(t) = u_{зи}(t) = U_{CM} + U_m \cos \omega t, \quad (3.1)$$

то ток, протекающий в цепи стока i_c , из-за нелинейности характеристики транзистора будет иметь вид периодической последовательности импульсов (рис. 3.3), которые можно разложить в тригонометрический ряд Фурье

$$i_c(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \cos(n\omega t + \varphi_n), \quad (3.2)$$

где I_0 — постоянная составляющая тока стока; I_{nm} и φ_n — амплитуды и начальные фазы гармоник соответственно.

Если колебательный контур, включенный в цепи стока, настроен на одну из гармоник входного сигнала, т. е.

$$\omega_p = n\omega,$$

где ω_p — резонансная частота контура ($\omega_p \approx \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, L и C — индуктивность и емкость контура), то выходное напряжение усилителя

$$u_{\text{вых}}(t) = E_c - R_{\text{oe}} I_{nm} \cos(n\omega t + \varphi_n) = E_c - U_{nm} \cos(n\omega t + \varphi_n), \quad (3.3)$$

где E_c — ЭДС стокового питания; R_{oe} — резонансное сопротивление контура; U_{nm} — амплитуда n -й гармоники напряжения на контуре. При этом предполагается, что контур обладает высокой добротностью и его сопротивление для остальных гармоник, кроме n -й, пренебрежимо мало. Если $n = 1$, то будет иметь место усиление, а если $n = 2, 3$ и т. д., то — умножение частоты.

Зависимость амплитуды первой гармоники тока транзистора I_{1m} или первой гармоники выходного напряжения нелинейного резонансного усилителя U_{1m} от амплитуды входного напряжения U_m называется *колебательной характеристикой*.

В общем случае расчет колебательной характеристики представляет сложную задачу. Если транзистор работает в недонапряженном режиме, т. е. если амплитуда переменного напряжения на стоке меньше определенного значения

$$U_{1m} < E_c - U_{\text{ост}},$$

где $U_{\text{ост}}$ — остаточное напряжение между стоком и истоком, составляющее 1–3 В, то влиянием выходной характеристики транзистора, т. е. зависимостью тока стока от напряжения между стоком и истоком $i_c(u_{\text{си}})$, можно пренебречь и воспользоваться приведенной ниже методикой расчета колебательной характеристики. Данные расчеты используются для оценки работы

усилителя на начальном участке колебательной характеристики и для приближенной оценки границы недонапряженного и перенапряженного режимов.

Аппроксимация характеристик нелинейных элементов

Характеристика нелинейного элемента, в данном случае сток-затворная характеристика транзистора, т. е. зависимость $i_c(u_{зи})$, может быть получена экспериментальным путем. Для аналитического описания процессов в нелинейной цепи необходимо выполнить аппроксимацию характеристики — подобрать функцию, которая описывала бы характеристику с достаточной степенью точности. Наиболее часто используют следующие способы аппроксимации.

1. Полиномиальная аппроксимация. Применяется при малых относительно ширины характеристики амплитудах входного воздействия. При полиномиальной аппроксимации характеристика нелинейного элемента на некотором участке заменяется полиномом n -й степени

$$i_c = a_0 + a_1 u_{зи} + a_2 u_{зи}^2 + \dots + a_n u_{зи}^n. \quad (3.4)$$

Для определения коэффициентов $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ можно использовать метод выбранных точек: необходимо потребовать, чтобы в $(n + 1)$ точках, называемых *узлами аппроксимации*, значения полинома совпадали со значениями реальной характеристики (рис. 3.4)

$$\begin{cases} i_c(1) = a_0 + a_1 u_{зи}(1) + a_2 u_{зи}^2(1) + \dots + a_n u_{зи}^n(1); \\ i_c(2) = a_0 + a_1 u_{зи}(2) + a_2 u_{зи}^2(2) + \dots + a_n u_{зи}^n(2); \\ \dots \\ i_c(n+1) = a_0 + a_1 u_{зи}(n+1) + a_2 u_{зи}^2(n+1) + \dots + a_n u_{зи}^n(n+1). \end{cases}$$

Составив таким образом систему из $(n + 1)$ уравнений и решив ее, получим значения коэффициентов полинома. Чем выше

степень полинома, тем выше точность аппроксимации. Необходимо также учитывать, что функция (3.4) описывает характеристику лишь на определенном участке от $u_{зи}(1)$ до $u_{зи}(n+1)$, при выходе за пределы которого точность аппроксимации значительно снижается (рис. 3.4).

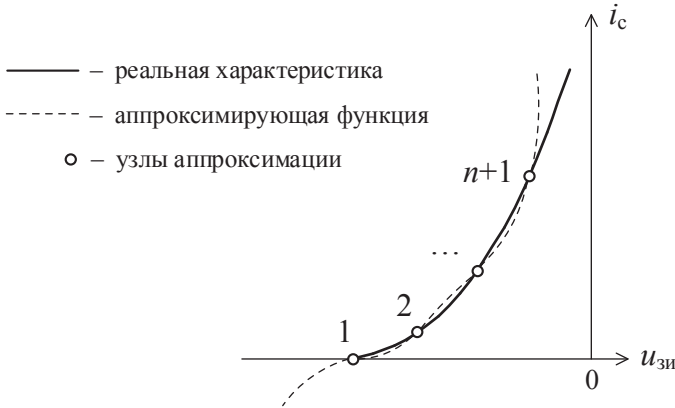


Рис. 3.4. Полиномиальная аппроксимация характеристики нелинейного элемента

В работе используется аппроксимация характеристики транзистора полиномом 3-й степени

$$i_c = a_0 + a_1 u_{зи} + a_2 u_{зи}^2 + a_3 u_{зи}^3. \quad (3.5)$$

Если подставить в это выражение закон изменения входного напряжения (3.1) и учесть, что

$$(x + y)^2 = x^2 + 2xy + y^2, \quad (x + y)^3 = x^3 + 3x^2y + 3xy^2 + y^3, \quad (3.6)$$

$$\cos^2 x = \frac{1}{2}(1 + \cos 2x), \quad \cos^3 x = \frac{1}{4}(3 \cos x + \cos 3x), \quad (3.7)$$

получим закон изменения тока стока

$$i_c(t) = I_0 + I_{1m} \cos \omega t + I_{2m} \cos 2\omega t + I_{3m} \cos 3\omega t, \quad (3.8)$$

$$\text{где } I_0 = a_0 + a_1 U_{\text{см}} + a_2 U_{\text{см}}^2 + \frac{1}{2} a_2 U_m^2 + a_3 U_{\text{см}}^3 + \frac{3}{2} a_3 U_{\text{см}} U_m^2, \quad (3.9)$$

$$I_{1m} = a_1 U_m + 2a_2 U_{\text{см}} U_m + 3a_3 U_{\text{см}}^2 U_m + \frac{3}{4} a_3 U_m^3, \quad (3.10)$$

$$I_{2m} = \frac{1}{2} a_2 U_m^2 + \frac{3}{2} a_3 U_{\text{см}} U_m^2,$$

$$I_{3m} = \frac{1}{4} a_3 U_m^3.$$

2. Полиномиальная аппроксимация в окрестности рабочей точки. Данный способ является разновидностью полиномиальной аппроксимации и основан на разложении характеристики нелинейного элемента в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки $U_{\text{см}}$

$$i_c = a_0 + a_1 (u_{\text{зи}} - U_{\text{см}}) + a_2 (u_{\text{зи}} - U_{\text{см}})^2 + \dots + a_n (u_{\text{зи}} - U_{\text{см}})^n. \quad (3.11)$$

Коэффициенты $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ в этом случае имеют смысл производных

$$a_k = \frac{1}{k!} \left. \frac{d^k i_c}{du_{\text{зи}}^k} \right|_{u_{\text{зи}} = U_{\text{см}}}$$

и могут быть определены методом выбранных точек или с помощью формул графического дифференцирования. Постоянную составляющую I_0 и амплитуды гармонических составляющих I_{nm} тока можно определить путем подстановки входного напряжения (3.1) в формулу (3.11) с выполнением определенных преобразований в соответствии с формулами (3.7) либо рассчитать, используя метод трех или пяти ординат [3, с. 67].

3. Кусочно-линейная аппроксимация. Применяется при больших амплитудах входного воздействия, основана на замене реальной характеристики отрезками прямых. Один из способов выполнения кусочно-линейной аппроксимации состоит в проведении касательной к графику реальной характеристики, как показано на рис. 3.5.

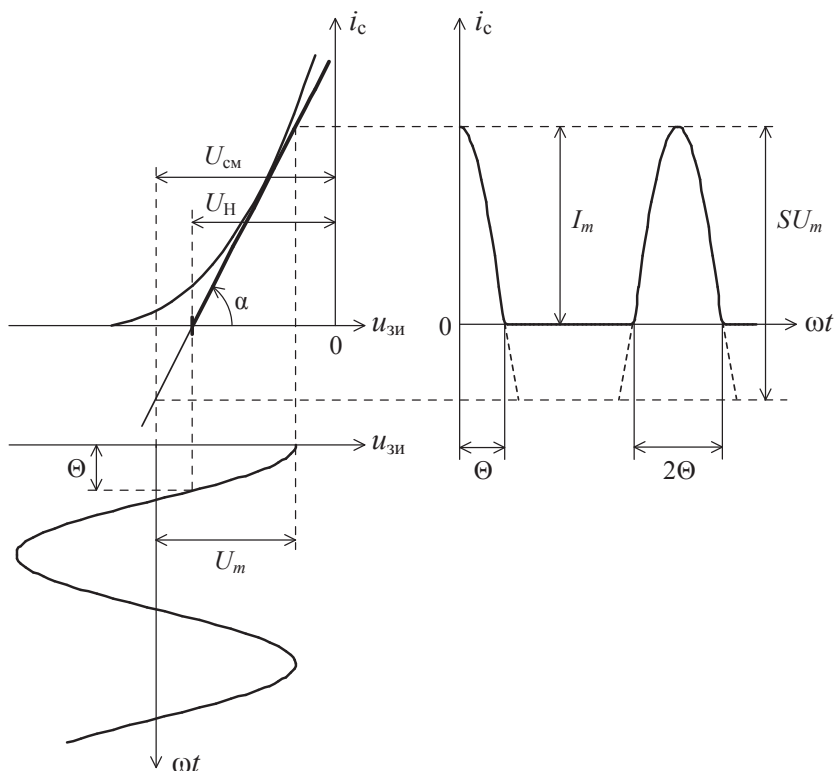


Рис. 3.5. Графики, поясняющие преобразование гармонического колебания при кусочно-линейной аппроксимации

В этом случае аппроксимирующая функция описывается выражением

$$i_c = \begin{cases} 0, & u_{зи} < U_H; \\ S(u_{зи} - U_H), & u_{зи} \geq U_H, \end{cases} \quad (3.12)$$

где U_H — напряжение начала аппроксимированной характеристики; S — крутизна, $S = \operatorname{tg} \alpha$. Ток нелинейного элемента в этом случае будет иметь вид последовательности косинусоидальных импульсов (рис. 3.5), которые можно разложить в тригономет-

трический ряд Фурье (3.2), при этом постоянная составляющая и амплитуды гармонических составляющих рассчитываются по формулам

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= SU_m \gamma_0(\theta), \\ I_{nm} &= SU_m \gamma_n(\theta), \quad n=1, 2, 3, \dots, \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

где $\gamma_0(\theta)$, $\gamma_n(\theta)$ — коэффициенты разложения косинусоидально-го импульса в ряд Фурье,

$$\left. \begin{aligned} \gamma_0(\theta) &= \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\pi}, \\ \gamma_1(\theta) &= \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{\pi}, \\ \gamma_n(\theta) &= \frac{2}{\pi} \frac{\sin(n\theta) \cos \theta - n \cos(n\theta) \sin \theta}{n(n^2 - 1)}, \quad n=2, 3, \dots \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Параметр θ в формулах (3.13), (3.14) называется *углом отсечки* — это часть полупериода, в течение которой протекает ток нелинейного элемента, может принимать значения от 0 до 180 градусов. Однако в формулы (3.14) необходимо подставлять угол θ в радианах. Находится угол отсечки из соотношения

$$\cos \theta = \frac{U_H - U_{cm}}{U_m}. \quad (3.15)$$

На рис. 3.6 показана зависимость коэффициентов γ от угла отсечки θ для постоянной составляющей и первых трех гармоник. Коэффициенты γ_n имеют максимум при значении $\theta = 180/n$, что необходимо учитывать при выборе угла отсечки в умножителях частоты.

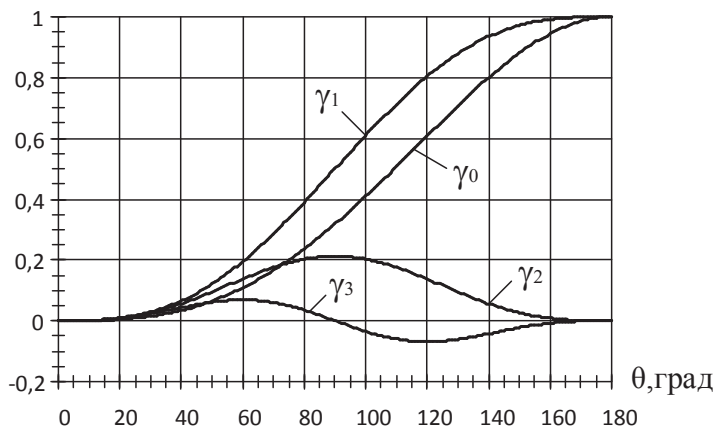


Рис. 3.6. Графики коэффициентов $\gamma_n(\theta)$

Энергетические преимущества режима с отсечкой

В нелинейном резонансном усилителе, работающем при больших амплитудах входного воздействия, режим с отсечкой позволяет уменьшить постоянную мощность, рассеиваемую на стоке транзистора, и тем самым повысить КПД.

Полезная мощность переменной составляющей на выходе усилителя

$$P_{\text{пол}} = \frac{1}{2} U_{1m} I_{1m} = \frac{1}{2} U_{1m} S U_m \gamma_1(\theta),$$

а постоянная мощность, рассеиваемая на стоке транзистора,

$$P_0 = E_c I_0 = E_c S U_m \gamma_0(\theta),$$

таким образом,

$$\text{КПД} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_0} = \frac{1}{2} \frac{U_{1m} \gamma_1(\theta)}{E_c \gamma_0(\theta)}.$$

Как показывает анализ выражений (3.14) и графиков (рис. 3.6), даже при $U_{1m} \approx E_c$, что обычно имеет место в мощ-

ных усилителях, если $\theta = 180$ град, т.е. транзистор работает без отсечки тока, то КПД = 50 %. Максимальное значение КПД 100 % достигается при $\theta = 0$. Однако при углах отсечки близких к нулю усилитель будет иметь недопустимо малый коэффициент усиления из-за низкого значения γ_1 . На практике в мощных усилителях выбирают угол отсечки близкий к 90 градусам.

Квазилинейный метод

При анализе нелинейных цепей с избирательной нагрузкой может использоваться квазилинейный метод, при котором параметры нелинейного элемента приводятся к соответствующей гармонике тока. Например, можно ввести в рассмотрение среднюю крутизну по первой гармонике $S_1 = I_{1m}/U_m$. При аппроксимации характеристики полиномом третьей степени с учетом выражения (3.10) средняя крутизна будет

$$S_1 = \frac{I_{1m}}{U_m} = a_1 + 2a_2 U_{cm} + 3a_3 U_{cm}^2 + \frac{3}{4}a_3 U_m^2. \quad (3.16)$$

При кусочно-линейной аппроксимации с учетом формулы (3.13)

$$S_1 = \frac{I_{1m}}{U_m} = S\gamma_1(\theta). \quad (3.17)$$

В таком случае амплитуда первой гармоники выходного напряжения

$$U_{1m} = R_{oe} I_{1m} = R_{oe} S_1 U_m \quad (3.18)$$

и коэффициент усиления нелинейного резонансного усилителя

$$K_1 = \frac{U_{1m}}{U_m} = S_1 R_{oe}. \quad (3.19)$$

3.2. Домашнее задание

Данные для выполнения задания приведены в прил. 4, а также в файле «Данные к стендам нелинейные цепи. xls». Пример выполнения расчетов в программе Mathcad приведен в прил. 7.

1. Изобразите принципиальную схему нелинейного резонансного усилителя на полевом транзисторе и принципиальную схему апериодического усилителя, в котором колебательный контур заменен сопротивлением.

2. По заданным исходным данным рассчитайте резонансное сопротивление контура R_{0e} , используя формулы (2.11), (2.12) из домашнего задания к лабораторной работе № 2 (см. с. 33).

3. По заданной сток-затворной характеристике транзистора $i_c(u_{зи})$ выберите два значения напряжения смещения U_{cm1} , соответствующего току стока 2,7–3 мА, и U_{cm2} , соответствующего току стока 0,2–0,4 мА.

4. Выполните аппроксимацию сток-затворной характеристики полиномом 3-й степени (3.5) в диапазоне i_c от 0 до 8–10 мА, пользуясь методом выбранных точек. Постройте график аппроксимирующей функции, проверьте, насколько точно он повторяет реальную характеристику, при существенных отклонениях повторите расчет коэффициентов полинома, выбрав другие узлы аппроксимации.

5. Выполните кусочно-линейную аппроксимацию характеристики транзистора и определите ее параметры U_H и S , выбрав значение U_H примерно посередине между U_{cm1} и U_{cm2} .

6. Рассчитайте колебательную характеристику усилителя $U_{lm}(U_m)$ при аппроксимации характеристики транзистора полиномом 3-й степени для $U_{cm} = U_{cm1}$, используя квазилинейный метод, см. формулы (3.16), (3.18). Значения U_m изменяйте в таких пределах, чтобы U_{lm} менялась от 0 до 15–20 В, выбрав шаг таким образом, чтобы рассчитать от 8 до 12 точек. При этом следите, чтобы напряжение $U_{зи} = U_{cm} \pm U_m$ не выходило за пре-

дела участка, на котором выполнена аппроксимация. Расчеты оформите в виде таблицы:

$U_m, \text{ В}$	0									
$S_1, \text{ мА/В}$										
$U_{1m}, \text{ В}$	0									15...20

7. Рассчитайте колебательные характеристики усилителя $U_{1m}(U_m)$ при кусочно-линейной аппроксимации для $U_{cm} = U_{cm1}$ и для $U_{cm} = U_{cm2}$, используя квазилинейный метод, см. формулы (3.14), (3.15), (3.17), (3.18). Значения U_m изменяйте в таких пределах, чтобы U_{1m} менялась от 0 до 15–20 В, выбрав шаг таким образом, чтобы рассчитать от 8 до 12 точек. Результаты оформите в виде таблиц:

$U_m, \text{ В}$	0									
$\cos\theta$										
$\theta, \text{ град}$										
$\gamma_1(\theta)$										
$S_1, \text{ мА/В}$										
$U_{1m}, \text{ В}$	0									15...20

8. Постройте графики рассчитанных колебательных характеристик (3 графика). По построенным графикам определите критические значения $U_{mкр}$, соответствующие границе недо-напряженного и перенапряженного режимов, т.е. при которых $U_{1m} = E_c - U_{ост}$, считая $E_c = 12 \text{ В}$, $U_{ост} = 2 \text{ В}$. Определите коэффициенты усиления, см. выражение (3.19), при $U_m \approx 0,2U_{mкр}$ и $U_m \approx 0,7U_{mкр}$.

9. Ознакомьтесь с экспериментальным заданием и описанием исследуемого модуля «Нелинейные цепи» (см. лабораторную работу № 2, п. 2.3, с. 34).

3.3. Экспериментальное задание

Работа выполняется на базе лабораторной станции NI ELVIS, описание которой приведено в прил. 3, 6. На макетную плату устанавливается модуль «Нелинейные цепи», описание которого приведено в лабораторной работе № 2 (см. с. 34).

1. Подготовка к исследованиям. Включите питание компьютера, дождитесь загрузки операционной системы и служебных программ.

Включите системное питание рабочей станции NI ELVIS выключателем на задней панели.

Установите переключатель «COMMUNICATIONS» на передней панели рабочей станции NI ELVIS в положение «NORMAL».

Включите программный режим управления регулируемые источниками и функциональным генератором, установив переключатели «MANUAL» на передней панели рабочей станции в нижнее положение.

2. Исследование апериодического усилителя.

2.1. Соберите схему апериодического усилителя, для этого:

- подключите исток транзистора к общей шине с помощью перемычки $J5$;
- в цепь стока подключите резистор $R3$, используя перемычку $J4$;
- конденсатор $C3$ отключите при помощи перемычки $J3$.

2.2. Включите питание макетной платы выключателем «PROTOTYPING BOARD POWER» на передней панели рабочей станции NI ELVIS, запустите программное обеспечение NI ELVIS, дождитесь инициализации системы, откройте следующие приборы:

- цифровой мультиметр Digital Multimeter (в ответ на появившееся сообщение «For maximum accuracy, use the DMM nulling...» нажмите **OK**);

- функциональный генератор Function Generator;
 - регулируемые источники питания Variable Power Supplies.
- Расположите ИПУ приборов на экране так, чтобы они не перекрывались.

2.3. Проверьте правильность выбора рабочих точек, для этого:

- проверьте, что функциональный генератор выключен, при этом в поле частоты должно отображаться значение «OFF», иначе щелкните левой клавишей мыши по кнопке **On** на ИПУ;
- соедините гнезда «Вольтм» и «U_см» исследуемого модуля; на ИПУ регулируемых источников установите значение отрицательного напряжения SUPPLY–, равное $U_{см1}$ (см. п. 3 домашнего задания); измерьте установленное значение мультиметром, отклонение не должно превышать $(\pm 5)\%$; измерьте мультиметром ЭДС стокового питания E_c и напряжение на стоке $U_{вых}$, соединяя гнездо «Вольтм» поочередно с гнездами «E_с» и «U_вых»; рассчитайте ток стока $i_c = (E_c - U_{вых})/R3$, где $R3 = 2\text{ кОм}$; убедитесь, что значению $U_{см1}$ соответствует $i_c = 2,7...3\text{ мА}$, при несоответствии подкорректируйте $U_{см1}$ в небольших пределах;
- повторите предыдущий пункт для $U_{см2}$, убедитесь, что $U_{см2}$ соответствует $i_c = 0,2...0,4\text{ мА}$, при несоответствии подкорректируйте $U_{см2}$ в небольших пределах;
- по завершении проверки соедините гнезда «Вольтм» и «U_см» исследуемого модуля и закройте ИПУ цифрового мультиметра.

2.4. Исследуйте усилитель в режиме малого сигнала:

- откройте двухканальный осциллограф Oscilloscope, используя панель запуска приборов «ELVIS — Instrument Launcher», расположите ИПУ приборов на экране так, чтобы они не перекрывались;
- на ИПУ регулируемых источников установите значение отрицательного напряжения SUPPLY–, равное $U_{см1}$;

- включите функциональный генератор кнопкой **On** на ИПУ; в поле ввода-вывода **Frequency** введите с клавиатуры заданное значение частоты f_p (см. прил. 4), дождитесь, когда в поле частоты появится введенное значение (с некоторой погрешностью) и погаснет надпись «*TUNING*» (в выпадающем списке «Tuning Mode» должно быть установлено значение «UltraFine»); в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** введите с клавиатуры значение 0,2 В;
- включите отображение обоих каналов осциллографа кнопками **Display ON/OFF** на ИПУ и включите режим измерения параметров сигнала в обоих каналах кнопками **MEAS**; на вход канала А подайте напряжение с выхода генератора, выбрав в выпадающем списке **Source** канала А значение «ACH1»; на вход канала В — выходное напряжение усилителя, выбрав в выпадающем списке **Source** канала В значение «ACH0»; установите длительность развертки **TIMEBASE** 10 мкс/дел.; в качестве источника синхронизации **TRIGGER/Source** выберите «CH A»;
- с помощью регуляторов «Position» расположите сигнал канала А в верхней части экрана ИПУ осциллографа, а сигнал канала В в нижней части, при этом выберите масштабы **VERTICAL/Scale** таким образом, чтобы каждый сигнал занимал от 1/3 до 1/2 экрана;
- проверьте, что в канале А наблюдается гармонический сигнал с частотой и амплитудой, которые установлены на генераторе (для этого используйте измерители, расположенные под экраном осциллографа, учтите, что амплитуда гармонического сигнала $U_m = \sqrt{2}RMS = V_{p-p}/2$), а в канале В — сигнал близкий по форме к гармоническому с такой же частотой, с амплитудой в 3–8 раз большей; скопируйте в буфер обмена (<Alt>+<PrintScreen>) и затем вставьте в файл (<Ctrl>+<V>) ИПУ осциллографа;

- установите значение отрицательного напряжения **SUPPLY–**, равное U_{cm2} , откорректируйте масштаб **VERTICAL/Scale** в канале В осциллографа, как написано в предыдущих пунктах, скопируйте (**<Alt>+<PrintScreen>**) и затем вставьте в файл (**<Ctrl>+<V>**) ИПУ осциллографа.

2.5. Исследуйте усилитель в режиме большого сигнала. Для этого на ИПУ генератора в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** введите с клавиатуры значение 1 В. Повторите исследования аналогично п. 2.4 для двух значений напряжения смещения U_{cm1} и U_{cm2} , при этом обратите внимание на изменение формы сигнала на выходе усилителя (канал В осциллографа); скопируйте (**<Alt>+<PrintScreen>**) и вставьте в файл (**<Ctrl>+<V>**) ИПУ осциллографа.

3. Исследование резонансного усилителя. В данном пункте используются открытые в предыдущих пунктах ИПУ приборов — регулируемые источники, функциональный генератор, осциллограф с выбранными источниками сигналов — канал А — АСН1, канал В — АСН0.

3.1. Соберите схему резонансного усилителя: в цепь стока подключите колебательный контур $L1L2C5$, используя переключку $J4$.

3.2. Проверьте настройку контура в резонанс:

- установите значение отрицательного напряжения **SUPPLY–**, равное U_{cm1} ; в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора введите с клавиатуры значение 0,2 В; на ИПУ осциллографа расположите сигналы и выберите масштабы, как было описано выше, в п. 2.4;
- вводя с клавиатуры в поле ввода-вывода **Frequency** на ИПУ генератора значения $f_p, f_p + 100$ Гц, $f_p + 200$ Гц, ... и т. д. либо $f_p - 100$ Гц, $f_p - 200$ Гц, ... и т. д., найдите и установите значение частоты f_{p0} , соответствующее максимуму выходного напряжения усилителя (контролируйте по параметру **RMS** в канале В осциллографа); при этом необходимо следить, чтобы усилитель работал

в недонапряженном режиме (данный режим гарантированно обеспечивается, если $U_{\text{тввых}} < 0,5E_c$ или $V_{p-p} < E_c$, где $E_c \approx 11,5 \text{ В}$), иначе необходимо уменьшить значение, установленное в поле **Peak Amplitude** на ИПУ генератора до $0,1\text{--}0,15 \text{ В}$ (рекомендуется вводить с клавиатуры).

3.3. Снимите колебательные характеристики для двух значений напряжения смещения — $U_{\text{см1}}$ и $U_{\text{см2}}$, для этого:

- установите значение отрицательного напряжения SUPPLY–, равное $U_{\text{см1}}$;
- устанавливая в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора значения от 0 до $2,5 \text{ В}$ (рекомендуется вводить с клавиатуры с шагом $0,1\text{--}0,2 \text{ В}$), по измерителям осциллографа снимите зависимость действующего значения (*RMS*) выходного напряжения $U_{\text{RMSвых}}$ (канал В) от действующего значения входного напряжения $U_{\text{RMSвх}}$ (канал А), при этом следите, чтобы исследуемые сигналы не выходили за пределы экрана осциллографа, при необходимости изменяйте масштабы **VERTICAL/Scale**, результаты занесите в таблицу, форма которой приведена в п. 1 обработки результатов (измерения можно прекратить, если имеет место значительное искажение выходного сигнала, при этом выходное напряжение почти не изменяется и $U_{1m} = \sqrt{2}U_{\text{RMSвых}} \approx E_c$);
- установите значение отрицательного напряжения SUPPLY–, равное $U_{\text{см2}}$; повторите снятие зависимости $U_{\text{RMSвых}}$ ($U_{\text{RMSвх}}$).

4. Исследование усилителя в режиме умножения частоты.

4.1. Установите значение отрицательного напряжения SUPPLY–, равное $U_{\text{см2}}$; в поле ввода-вывода **Frequency** на ИПУ генератора введите с клавиатуры значение частоты $f_{p0}/2$; в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** введите с клавиатуры значение $1,0 \text{ В}$. С помощью осциллографа измерьте частоты сигналов на входе (канал А) и на выходе (канал В) усилителя, убедитесь,

что усилитель работает в режиме удвоения частоты, при этом выберите масштабы **VERTICAL/Scale** таким образом, чтобы каждый сигнал занимал от 1/3 до 1/2 экрана. Изменяя значение отрицательного напряжения **SUPPLY**– кнопками инкремента–декремента, добейтесь максимальной амплитуды второй гармоники на выходе усилителя; скопируйте (<Alt>+<PrintScreen>) и вставьте в файл (<Ctrl>+<V>) ИПУ осциллографа. Определите коэффициент усиления в режиме удвоения частоты $K_2 = U_{RMS_{ВЫХ}} / U_{RMS_{ВХ}}$.

4.2. Введите в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора с клавиатуры значение 0,2 В; повторите исследование усилителя в режиме удвоения частоты аналогично предыдущему пункту; скопируйте (<Alt>+<PrintScreen>) и вставьте в файл (<Ctrl>+<V>) ИПУ осциллографа.

3.4. Обработка результатов

1. По результатам п. 3.3 экспериментального задания рассчитайте колебательные характеристики U_{1m} (U_m), где $U_{1m} = \sqrt{2}U_{RMS_{ВЫХ}}$, $U_m = \sqrt{2}U_{RMS_{ВХ}}$, для $U_{см1}$ и $U_{см2}$. Результаты оформите в виде таблиц:

$U_{RMS_{ВХ}}$, В										
$U_{RMS_{ВЫХ}}$, В										
U_m , В										
U_{1m} , В										

2. Постройте графики колебательных характеристик U_{1m} (U_m) для $U_{см1}$ и $U_{см2}$. По построенным графикам определите критические значения амплитуд входного сигнала $U_{мкр}$, соответствующие границе недонапряженного и перенапряженного режимов (определяется по характерному уменьшению коэффициента

усиления при приближении U_{1m} к E_C). Определите коэффициенты усиления $K_1 = U_{1m}/U_m$ при $U_m \approx 0,7U_{mкр}$ и $U_m \approx 0,2U_{mкр}$. Составьте таблицу сравнения результатов расчета и эксперимента:

Параметр	$U_{cm} = U_{cm1}$		$U_{cm} = U_{cm2}$	
	расч.		расч.	эксп.
	полином.	кус.-лин.	кус.-лин.	эксп.
$U_{mкр}, В$				
$K_1(0,2U_{mкр})$				
$K_1(0,7U_{mкр})$				

3.5. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) принципиальную схему нелинейного резонансного усилителя и принципиальную схему апериодического усилителя;
- 3) результаты расчетов, выполненных при подготовке к работе, в виде числовых значений, таблиц и графиков;
- 4) результаты эксперимента — название исследования, условия (числовые параметры), при которых проведены исследования, числовые значения, полученные при выполнении измерений, осциллограммы сигналов в виде скриншотов ИПУ осциллографа;
- 5) результаты обработки экспериментальных данных — таблицы значений и графики колебательных характеристик с указанием на них точек $U_{mкр}$, $0,7U_{mкр}$, $0,2U_{mкр}$;
- 6) таблицу сравнения результатов расчета и эксперимента;
- 7) выводы, содержащие анализ результатов работы.

Контрольные вопросы

1. Что такое типовое радиотехническое звено? Как рассматривается преобразование сигнала типовым радиотехническим звеном? Приведите примеры типового радиотехнического звена.
2. Изобразите схему нелинейного резонансного усилителя, поясните назначение элементов и принцип работы.
3. Что такое аппроксимация характеристик нелинейных элементов, какие существуют способы аппроксимации?
4. Когда необходимо применять полиномиальную аппроксимацию, а когда — кусочно-линейную?
5. Как рассчитать коэффициенты полинома при полиномиальной аппроксимации?
6. Как определить постоянную составляющую и амплитуды гармонических составляющих тока при полиномиальной аппроксимации?
7. Как определить постоянную составляющую и амплитуды гармонических составляющих тока при кусочно-линейной аппроксимации?
8. Что такое угол отсечки, как изменяется угол отсечки при изменении U_m от 0 до ∞ , если: а) $U_{cm} < U_H$; б) $U_{cm} > U_H$?
9. Сформулируйте определение колебательной характеристики нелинейного резонансного усилителя.
10. Как рассчитать колебательную характеристику нелинейного резонансного усилителя: а) при полиномиальной аппроксимации; б) при кусочно-линейной аппроксимации?
11. Как изменится колебательная характеристика при увеличении, уменьшении: а) U_{cm} ; б) R_{oe} ; в) E_c ?
12. В чем суть квазилинейного метода анализа нелинейных цепей, что такое средняя крутизна?
13. В чем энергетические преимущества режима с отсечкой?
14. Поясните принцип работы умножителя частоты.
15. Как необходимо выбирать угол отсечки в умножителях частоты и почему?

Лабораторная работа № 4

Исследование амплитудного модулятора

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — исследование физических процессов при модуляции смещением в амплитудном модуляторе и изучение методов их математического описания. Ознакомление с принципами работы амплитудного модулятора и экспериментальное измерение его характеристик.

4.1. Теоретическая часть

Принцип работы амплитудного модулятора

Амплитудно-модулированные колебания были описаны в теоретической части лабораторной работы № 1 (см. с. 13) и теоретической части лабораторной работы № 2 (см. с. 25). Однотональный АМ-сигнал можно сформировать с помощью нелинейного резонансного усилителя, рассмотренного в лабораторной работе № 3, если к его входу подвести сумму напряжений

$$u_{\text{вх}}(t) = u_{\text{зи}}(t) = U_{\text{см}} + U_{\Omega} \cos \Omega t + U_m \cos \omega t, \quad (4.1)$$

где $U_{\text{см}}$ — постоянное напряжение смещения, определяющее рабочую точку; U_{Ω} — амплитуда модулирующего напряжения; Ω — модулирующая (низкая) частота; U_m — амплитуда несущего колебания на входе модулятора; ω — несущая (высокая) частота. Схема амплитудного модулятора показана на рис. 4.1.

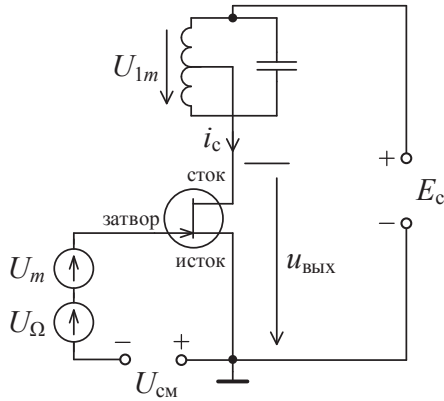


Рис. 4.1. Принципиальная схема амплитудного модулятора

Как показывает анализ прохождения суммы гармонических колебаний через безынерционный нелинейный элемент [1], ток стока $i_c(t)$ в этом случае будет содержать гармонические колебания с кратными частотами: Ω , 2Ω , 3Ω , ... и т.д., ω , 2ω , 3ω , ... и т.д. — и колебания с комбинационными частотами $n\omega \pm m\Omega$, где $n, m = 1, 2, 3$ и т.д. Если сток-затворная характеристика транзистора $i_c(u_{зи})$ аппроксимирована полиномом 3-й степени (3.5), то спектральный состав тока стока будет иметь вид, показанный на рис. 4.2.

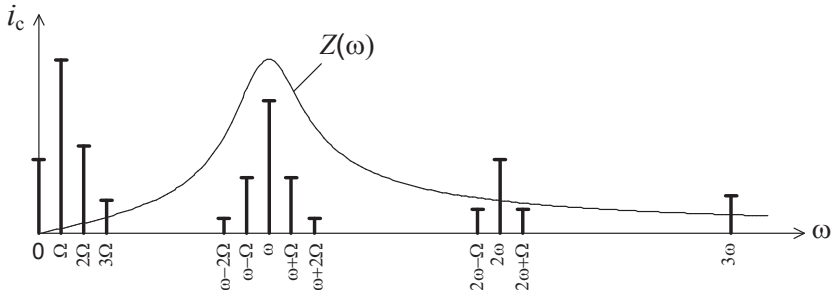


Рис. 4.2. Спектр тока транзистора при амплитудной модуляции

Если теперь ток стока $i_c(t)$ пропустить через колебательный контур, настроенный на несущую частоту, $\omega_p = \omega$, где ω_p — резонансная частота контура, то на контуре выделятся спектральные составляющие АМ-колебания, т. к. полное сопротивление контура $Z(\omega)$ будет велико для составляющих с частотами ω , $\omega \pm \Omega$ и мало для остальных составляющих (рис. 4.2), в результате выходное напряжение модулятора будет изменяться по закону

$$u_{\text{вых}}(t) \approx E_c - U_{1m} [1 + M \cos \Omega t] \cos \omega t,$$

где U_{1m} — амплитуда первой гармоники выходного напряжения в отсутствие модуляции.

Как видно из рис. 4.2, в спектре полученного АМ-колебания будут присутствовать боковые составляющие с частотами $\omega \pm 2\Omega$, а в общем случае и с частотами $\omega \pm 3\Omega$, $\omega \pm 4\Omega$, ... и т. д., что приведет к нелинейным искажениям огибающей. Однако при правильном выборе рабочей точки, т. е. U_{cm} , эти искажения будут практически нулевыми в широком диапазоне коэффициента модуляции M . Кроме того, при выборе параметров модулятора необходимо обеспечить выполнение соотношения $2\Delta\omega \geq 2\Omega$, где $2\Delta\omega$ — полоса пропускания контура, $2\Delta\omega = \omega_p/Q$ (Q — добротность), иначе боковые составляющие $\omega \pm \Omega$ будут в значительной степени подавлены, что приведет к снижению коэффициента модуляции.

Работу модулятора можно пояснить графиками, показанными на рис. 4.3.

Из выражения (4.1) и рис. 4.3 следует, что низкочастотное модулирующее напряжение $U_\Omega \cos \Omega t$ будет изменять рабочую точку на характеристике транзистора, т. е. результирующее напряжение смещения

$$U_{cm}(t) = U_{cm} + U_\Omega \cos \Omega t, \quad (4.2)$$

в пределах от $U_{cm} - U_\Omega$ до $U_{cm} + U_\Omega$. В результате будет изменяться высота импульсов тока стока i_c (рис. 4.3), а значит, ам-

плитуды гармонических составляющих I_{nm} в выражении (3.2) и амплитуда напряжения U_{nm} (3.3) на выходе нелинейного резонансного усилителя.

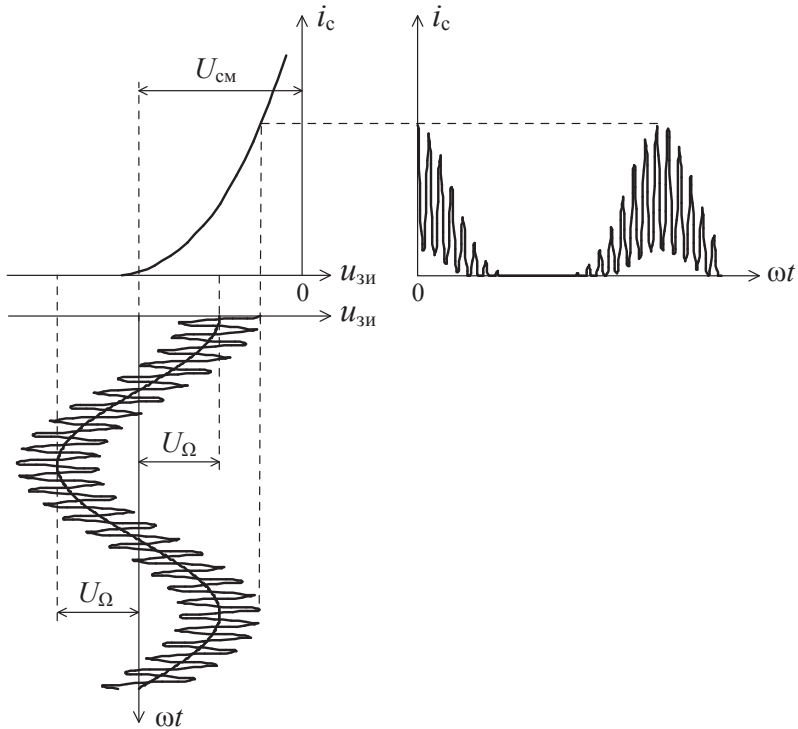


Рис. 4.3. Преобразование суммы несущего и модулирующего колебаний при модуляции смещением

Если сток-затворная характеристика транзистора аппроксимирована полиномом 3-й степени (3.5), то, подставляя выражение (4.2) в формулу (3.10), можно найти закон изменения амплитуды первой гармоники тока стока I_{1m} и закон изменения амплитуды первой гармоники выходного напряжения U_{1m} , используя формулу (3.18).

При кусочно-линейной аппроксимации характеристики изменения напряжения смещения (4.2) приведет к изменению угла отсечки θ в соответствии с выражением (3.15), а значит, к изменению коэффициента $\gamma_1(\theta)$ и изменению амплитуды первой гармоники тока I_{1m} согласно формулам (3.13), (3.14).

Характеристики модулятора

Для выбора параметров модулятора и оценки качества воспроизведения огибающей АМ-колебания используют статическую и динамическую модуляционные характеристики.

Статическая модуляционная характеристика (СМХ) — это зависимость амплитуды первой гармоники выходного напряжения модулятора от напряжения смещения $U_{1m}(U_{см})$ при постоянной амплитуде несущего колебания $U_m = \text{const}$ на входе в отсутствие модулирующего напряжения.

Для расчета СМХ можно использовать формулы (3.10), (3.18) при полиномиальной аппроксимации характеристики транзистора и (3.13)–(3.15), (3.18) при кусочно-линейной либо воспользоваться квазилинейным методом (см. с. 55).

Динамическая модуляционная характеристика (ДМХ) представляет собой зависимость коэффициента модуляции первой гармоники выходного напряжения от амплитуды входного модулирующего колебания $M(U_{\Omega})$ при постоянной амплитуде несущего колебания $U_m = \text{const}$ на входе.

Для расчета ДМХ используется график статической модуляционной характеристики (рис. 4.4) либо описывающие ее аналитические выражения. Сначала выбирается рабочая точка $U_{см0}$, как правило, на середине линейного участка СМХ, относительно этой рабочей точки прикладывается низкочастотное модулирующее напряжение. После присвоения амплитуде модулирующего напряжения конкретного значения U_{Ω} определяются два значения амплитуды первой гармоники выходного напря-

жения $U_{1\text{ макс}}$ и $U_{1\text{ мин}}$, соответствующие двум значениям напряжения смещения $U_{\text{см}} = U_{\text{см}0} + U_{\Omega}$ и $U_{\text{см}} = U_{\text{см}0} - U_{\Omega}$, и затем рассчитывается коэффициент модуляции

$$M = \frac{U_{1\text{ макс}} - U_{1\text{ мин}}}{U_{1\text{ макс}} + U_{1\text{ мин}}}.$$

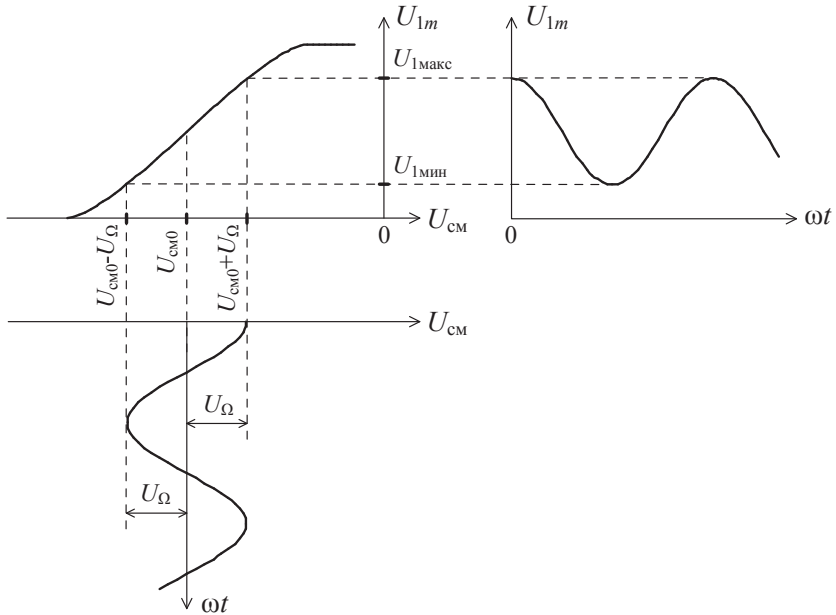


Рис. 4.4. Графики, поясняющие расчет динамической модуляционной характеристики

4.2. Домашнее задание

В работе используются результаты домашнего и экспериментального заданий, полученные при выполнении лабораторной работы № 3. Пример выполнения расчетов приведен в прил. 8.

1. Изобразите принципиальную схему амплитудного модулятора на полевом транзисторе с модуляцией смещением.

2. Рассчитайте характеристики модулятора (см. ниже, пп. а–г) при аппроксимации зависимости $i_c(u_{зи})$ полиномом 3-й степени для амплитуды входного несущего колебания $U_m = 0,3U_{\text{мкрп1Э}}$, где $U_{\text{мкрп1Э}}$ — экспериментально полученное в работе № 3 критическое значение амплитуды входного сигнала при напряжении смещения $U_{\text{см1}}$:

а) рассчитайте статическую модуляционную характеристику $U_{1м}(U_{\text{см}})$, используя квазилинейный метод (3.16), (3.18). Значения $U_{\text{см}}$ изменяйте в пределах от $U_{\text{зи}}(1) + U_m$ до $U_{\text{зи}}(4) - U_m$, где $U_{\text{зи}}(1)$ и $U_{\text{зи}}(4)$ — значения напряжения $u_{зи}$ в крайних узлах аппроксимации, с таким шагом, чтобы рассчитать от 10 до 15 точек. Расчеты оформите в виде таблицы:

$U_{\text{см}}, \text{В}$	$U_{\text{зи}}(1)+U_m$									$U_{\text{зи}}(4)-U_m$
$S_1, \text{мА/В}$										
$U_{1м}, \text{В}$										

б) постройте график и определите наиболее линейный участок статической модуляционной характеристики. Выберите рабочую точку $U_{\text{см0}}$ на середине данного участка, определите максимальную амплитуду модулирующего напряжения $U_{\Omega\text{макс}}$, при которой суммарное напряжение $U_{\text{см}} = U_{\text{см0}} \pm U_{\Omega\text{макс}}$ не будет выходить за пределы участка, на котором рассчитана характеристика;

в) рассчитайте динамическую модуляционную характеристику $M(U_{\Omega})$, при этом U_{Ω} изменяйте в пределах от 0 до $U_{\Omega\text{макс}}$, выбрав шаг таким образом, чтобы рассчитать от 8 до 10 точек. Расчеты оформите в виде таблицы:

$U_{\Omega}, \text{В}$	0									$U_{\Omega\text{макс}}$
$U_{1\text{макс}}, \text{В}$										
$U_{1\text{мин}}, \text{В}$										
M										

г) постройте график динамической модуляционной характеристики.

3. Рассчитайте характеристики модулятора (см. ниже, пп. а–д) при кусочно-линейной аппроксимации зависимости $i_c(u_{зи})$ для двух значений амплитуды входного несущего колебания $U_m = 0,3U_{\text{мкр1Э}}$ и $U_m = 0,7U_{\text{мкр1Э}}$ (где $U_{\text{мкр1Э}}$ — см. выше, п. 2):

а) рассчитайте статические модуляционные характеристики $U_{1m}(U_{\text{см}})$, используя квазилинейный метод (3.17), (3.18), (3.14), (3.15). Значения $U_{\text{см}}$ изменяйте в пределах от $U_H - U_m$ до $U_H + U_m$ с таким шагом, чтобы рассчитать от 10 до 15 точек. Расчеты оформите в виде таблиц:

$U_{\text{см}}, \text{В}$	$U_H - U_m$									$U_H + U_m$
$\cos\theta$	1									-1
$\theta, \text{град}$	0									180
$\gamma_1(\theta)$	0									1
$S_1, \text{мА/В}$	0									
$U_{1m}, \text{В}$	0									

б) постройте графики СМХ. На каждом графике (для $U_m = 0,3U_{\text{мкр1Э}}$ и $U_m = 0,7U_{\text{мкр1Э}}$) выберите рабочую точку $U_{\text{см0}}$ на середине линейного участка ($U_{\text{см0}}$ совпадает с U_H). Определите максимальную амплитуду модулирующего напряжения $U_{\Omega_{\text{макс}}}$, при которой суммарное напряжение $U_{\text{см}} = U_{\text{см0}} \pm U_{\Omega_{\text{макс}}}$ не будет выходить за пределы участка, на котором рассчитана характеристика ($U_{\Omega_{\text{макс}}}$ совпадает с U_m), и амплитуду модулирующего напряжения $U_{\Omega_{\text{лин}}}$, соответствующую границам линейного участка;

в) рассчитайте динамические модуляционные характеристики $M(U_{\Omega})$, при этом U_{Ω} изменяйте в пределах от 0 до $U_{\Omega_{\text{макс}}}$, выбрав шаг таким образом, чтобы рассчитать от 8 до 10 точек. Расчеты оформите в виде таблиц, аналогичных таблице в п. 2, в домашнего задания;

г) постройте графики ДМХ;

д) сравните графики СМХ и ДМХ при различных значениях U_m , сделайте вывод о влиянии U_m на вид графиков.

4. Ознакомьтесь с экспериментальным заданием.

4.3. Экспериментальное задание

Работа выполняется на базе лабораторной станции NI ELVIS, описание которой приведено в прил. 3, 6. На макетную плату устанавливается модуль «Нелинейные цепи», описание которого приведено в лабораторной работе № 2 (см. с. 34).

1. Подготовка к исследованиям. Включите питание компьютера, дождитесь загрузки операционной системы и служебных программ.

Включите системное питание рабочей станции NI ELVIS выключателем на задней панели.

Установите переключатель «COMMUNICATIONS» на передней панели рабочей станции NI ELVIS в положение «NORMAL».

Включите программный режим управления регулируемые источники и функциональным генератором, установив переключатели «MANUAL» на передней панели рабочей станции в нижнее положение.

2. Проверка калибровки регулируемых источников.

2.1. Соберите схему амплитудного модулятора, для этого:

- подключите исток транзистора к общей шине с помощью перемычки J5;
- в цепь стока подключите колебательный контур $L1L2C5$, используя перемычку J4.

2.2. Соедините гнезда «Вольтм» и «U_{см}» исследуемого модуля.

2.3. Включите питание макетной платы выключателем «PROTOTYPING BOARD POWER» на передней панели рабочей станции NI ELVIS, запустите программное обеспечение NI ELVIS, дождитесь инициализации системы, откройте следующие приборы:

- цифровой мультиметр Digital Multimeter (в ответ на появившееся сообщение «For maximum accuracy, use the DMM nulling...» нажмите **OK**);
- регулируемые источники питания Variable Power Supplies.

Расположите ИПУ приборов на экране так, чтобы они не перекрывались.

2.4. На ИПУ регулируемых источников установите значение отрицательного напряжения SUPPLY–, равное U_{cm1} (см. лабораторную работу № 3, п. 3 домашнего задания, с. 56); измерьте установленное значение мультиметром, отклонение не должно превышать $(\pm 5) \%$. Повторите измерения, устанавливая значения отрицательного напряжения SUPPLY–, согласно приведенной ниже таблице, где $\Delta U = (U_{cm1} - U_{cm2})/2$. Отклонения установленных и измеренных значений не должны превышать $(\pm 5) \%$.

$U_{уст}, В$	$U_{cm2} - 2\Delta U$	$U_{cm2} - \Delta U$	U_{cm2}	$U_{cm2} + \Delta U$	U_{cm1}	$U_{cm1} + \Delta U$	$U_{cm1} + 2\Delta U$
$U_{изм}, В$							

3. Исследование статических модуляционных характеристик.

3.1. Подготовьте к работе необходимые приборы:

- закройте ИПУ цифрового мультиметра;
- откройте двухканальный осциллограф Oscilloscope и функциональный генератор Function Generator, используя панель запуска приборов «ELVIS Instrument Launcher»;
- расположите ИПУ приборов на экране так, чтобы они не перекрывались.

3.2. Проверьте настройку контура в резонанс, для этого:

- на ИПУ регулируемых источников установите значение отрицательного напряжения SUPPLY–, равное U_{cm1} ;
- на ИПУ функционального генератора в поле ввода-вывода **Frequency** введите с клавиатуры значение частоты f_{p0} , полученное при настройке контура в резонанс в работе № 3; если в поле частоты отображается значение «OFF», щелкните по кнопке **On**; дождитесь, когда в поле частоты появится введенное значение (с некоторой погрешностью) и погаснет надпись «*TUNING*» (в выпадающем списке «Tuning Mode» должно быть установлено значение «UltraFine»);

- в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора введите с клавиатуры значение $U_m = 0,3U_{\text{мкр1Э}}$, где $U_{\text{мкр1Э}}$ — экспериментально полученное в работе № 3 критическое значение амплитуды входного сигнала при напряжении смещения $U_{\text{см1}}$;
- включите отображение обоих каналов осциллографа кнопками **Display ON/OFF** и режим измерения параметров сигнала в обоих каналах кнопками **MEAS**; на вход канала А подайте напряжение с выхода генератора, выбрав в выпадающем списке **Source** канала А значение «ACH1», а на вход канала В — выходное напряжение модулятора, выбрав в выпадающем списке **Source** канала В значение «ACH0»; установите длительность развертки **TIMEBASE** 10 мкс/дел.; в качестве источника синхронизации **TRIGGER/Source** выберите «CH A»;
- расположите с помощью регуляторов «Position» сигнал канала А в верхней части экрана осциллографа, а сигнал канала В в нижней части, выбрав масштабы **VERTICAL/Scale** таким образом, чтобы каждый сигнал занимал от 1/3 до 1/2 экрана;
- измерьте амплитуду напряжения U_m в канале А (по измерителям осциллографа, $U_m = \sqrt{2}RMS$ или $U_m = V_{p-p} / 2$), убедитесь, что она соответствует установленной с точностью (± 10) %;
- ввода с клавиатуры в поле ввода-вывода **Frequency** на ИПУ генератора значения $f_{p0} + 100$ Гц, $f_{p0} + 200$ Гц, ... и т.д. либо $f_{p0} - 100$ Гц, $f_{p0} - 200$ Гц, ... и т.д., убедитесь, что частоте f_{p0} соответствует максимум выходного напряжения модулятора (канал В осциллографа). При несоответствии подкорректируйте f_{p0} в небольших пределах с точностью 100 Гц. При этом модулятор должен работать в недонапряженном режиме ($U_{\text{твых}} \leq 0,5E_c$, $E_c \approx 11,5$ В); в противном случае проверьте установки напряжения смещения и амплитуды входного сигнала.

3.3. Снимите зависимость $U_{RMS_{ВЫХ}}(U_{СМ})$ для амплитуды входного несущего колебания $U_m = 0,3U_{мкр1Э}$, для этого:

- проверьте, что в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора установлено значение $U_m = 0,3U_{мкр1Э}$, проконтролируйте установленное значение при помощи осциллографа в канале А;
- изменяя значение отрицательного напряжения SUPPLY– (в сторону уменьшения с учетом знака) кнопками инкремента–декремента, установите значение, при котором действующее значение (*RMS*) выходного напряжения модулятора (канал В) будет равно 10...30 мВ;
- увеличивая (с учетом знака) напряжение SUPPLY– кнопками инкремента–декремента (на два дискрета), снимите зависимость действующего значения выходного напряжения модулятора $U_{RMS_{ВЫХ}}$ (*RMS* в канале В осциллографа) от установленного напряжения SUPPLY–, т. е. от напряжения смещения $U_{СМ}$. При этом корректируйте масштабы **VERTICAL/Scale** на ИПУ осциллографа, чтобы сигналы занимали от 1/3 до 1/2 экрана. Результаты занесите в таблицу. Зависимость необходимо снимать до тех пор, пока имеет место заметное изменение $U_{RMS_{ВЫХ}}$ при изменении $U_{СМ}$.

$U_{СМ}$, В										
$U_{RMS_{ВЫХ}}$, В										
U_{1m} , В										

3.4. Снимите зависимость $U_{RMS_{ВЫХ}}(U_{СМ})$ для амплитуды входного несущего колебания $U_m = 0,7U_{мкр1Э}$. Для этого в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора введите с клавиатуры значение $U_m = 0,7U_{мкр1Э}$ и повторите измерения аналогично пп. 3.3.

3.5. По результатам пп. 3.3, 3.4 рассчитайте статические модуляционные характеристики $U_{1m}(U_{СМ})$, где $U_{1m} = \sqrt{2}U_{RMS_{ВЫХ}}$, для $U_m = 0,3U_{мкр1Э}$ и $U_m = 0,7U_{мкр1Э}$, результаты занесите в таблицы.

Постройте графики СМХ $U_{1m}(U_{см})$ для двух значений U_m . На каждом графике определите линейный участок, выберите рабочую точку $U_{см0Э}$ на середине линейного участка, определите амплитуду модулирующего напряжения $U_{\Omega линЭ}$, соответствующую границам линейного участка (чтобы сумма–разность $U_{см0Э} \pm U_{\Omega линЭ}$ не выходила за пределы линейного участка) и максимальную амплитуду модулирующего напряжения $U_{\Omega максЭ}$, соответствующую границам СМХ (чтобы сумма–разность $U_{см0Э} \pm U_{\Omega максЭ}$ не выходила за пределы участка, на котором измерена СМХ). Результаты занесите в таблицу:

Параметр	U_m , В	
	$0,3U_{ткр1Э}$	$0,7U_{ткр1Э}$
$U_{см0Э}$, В		
$U_{\Omega линЭ}$, В		
$U_{\Omega максЭ}$, В		

4. Исследование формирования АМ-колебания.

4.1. Подготовьте к работе необходимые приборы:

- на ИПУ регулируемых источников установите значение отрицательного напряжения SUPPLY–, равное $U_{см0Э}$, для $U_m = 0,7U_{ткр1Э}$;
- в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора введите с клавиатуры значение $U_m = 0,7U_{ткр1Э}$;
- подключите источник модулирующего напряжения к макетной плате, для этого соедините штекер «земля» (черный) кабеля внешнего генератора GFG-8215A* с гнездом «BANANA В» макетной платы NI ELVIS PROTOTYPING BOARD, а сигнальный штекер (красный) — с гнездом «BANANA А»;

* Допускается применение в качестве источника модулирующего напряжения генератора SFG-2110 при самостоятельном изучении пользователем руководства по эксплуатации данного генератора.

- установите регуляторы генератора GFG-8215A «DUTY», «CMOS», «OFFSET», «AMPL» в нажатое положение; регулятор «AMPL» поверните в среднее положение; включите питание генератора GFG-8215A кнопкой «POWER»; выберите тип сигнала «синусоида» нажатием соответствующей кнопки; включите аттенюатор нажатием кнопки «ATT –20db»; установите частоту сигнала 200 Гц, выбрав соответствующий диапазон нажатием кнопки «100» и установив ручку «FREQUENCY» в положение «2»;
- на вход канала А осциллографа подайте модулирующее напряжение, выбрав в выпадающем списке **Source** канала А значение «ACH2»; установите длительность развертки **TIMEBASE** 2 мс/дел.; выберите масштабы **VERTICAL/Scale** так, чтобы каждый сигнал занимал от 1/3 до 1/2 экрана;
- убедитесь, что на осциллографе наблюдаются в канале А модулирующее напряжение частотой 200 (± 10) Гц и амплитудой 0,5 ($\pm 0,1$) В, а в канале В АМ-колебание; при необходимости подкорректируйте параметры модулирующего напряжения ручками «FREQUENCY» и «AMPL» генератора GFG-8215A.

4.2. Исследуйте модулятор при $U_m = 0,7U_{\text{мкр1Э}}$. Устанавливая ручкой «AMPL» (при необходимости выключить—включить аттенюатор кнопкой «ATT –20db») генератора GFG-8215A значения параметра V_{p-p} в канале А осциллографа $0,5U_{\Omega\text{максЭ0,7}}$; $1,5U_{\Omega\text{максЭ0,7}}$; $2U_{\Omega\text{максЭ0,7}}$; $2,5U_{\Omega\text{максЭ0,7}}$ ($U_{\Omega\text{максЭ0,7}}$ — максимальная амплитуда модулирующего напряжения для $U_m = 0,7U_{\text{мкр1Э}}$, определенная по экспериментальной СМХ в пп. 3.5), скопируйте (<Alt>+<PrintScreen>) и вставьте в файл (<Ctrl>+<V>) ИПУ осциллографа для каждого значения (5 скриншотов). При этом корректируйте масштабы **VERTICAL/Scale**, чтобы каждый сигнал занимал от 1/3 до 1/2 экрана осциллографа.

4.3. Исследуйте модулятор при уменьшении U_m до $0,3U_{\text{мкр1Э}}$. Установите ручкой «AMPL» генератора GFG-8215A значе-

ние V_{p-p} в канале А осциллографа, равное $U_{\Omega_{\text{макс}}90,7}$ (см. пп. 4.2); в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора введите с клавиатуры значение $U_m = 0,3U_{\text{мкр}1Э}$; на ИПУ регулируемых источников установите значение отрицательного напряжения **SUPPLY-**, равное $U_{\text{см}0Э}$, для $U_m = 0,3U_{\text{мкр}1Э}$. Откорректируйте масштабы **VERTICAL/Scale**, чтобы каждый сигнал занимал от 1/3 до 1/2 экрана осциллографа, скопируйте (**<Alt>+<PrintScreen>**) и вставьте в файл (**<Ctrl>+<V>**) ИПУ осциллографа.

4.4. Исследуйте входное и выходное напряжение модулятора при различной форме модулирующего колебания (напряжение **SUPPLY-**, параметры несущего и модулирующего колебаний оставьте, как в предыдущем пункте):

- соедините гнезда «Вольтм» и «U_{вх}» усилителя исследуемого модуля; в выпадающем списке **Source** канала А осциллографа выберите значение «DMM Voltage», а в выпадающем списке «Coupling» канала А — значение «AC»; в качестве источника синхронизации **TRIGGER/Source** выберите значение «Immediate»; откорректируйте масштабы **VERTICAL/Scale**, как описано выше, скопируйте (**<Alt>+<PrintScreen>**) и вставьте в файл (**<Ctrl>+<V>**) ИПУ осциллографа;
- выберите тип сигнала генератора GFG-8215A — прямоугольные импульсы — нажатием соответствующей кнопки; скопируйте и вставьте в файл ИПУ осциллографа.

4.4. Обработка результатов

По результатам п. 4.2 экспериментального задания рассчитайте динамическую модуляционную характеристику $M(U_\Omega)$ для $U_m = 0,7U_{\text{мкр}1Э}$, при этом учтите, что $U_\Omega = V_{p-p}/2$. Определение коэффициента модуляции M по осциллограмме поясняется рис. 2.4 и формулой (2.13) в лабораторной работе № 2 (см. с. 42). Результаты занесите в таблицу:

$U_{\Omega}, \text{В}$	0					
M	0					

Постройте график экспериментальной ДМХ $M(U_{\Omega})$ для $U_m = 0,7U_{\text{мкр1}\Omega}$.

По результатам п. 4.3 экспериментального задания рассчитайте коэффициент модуляции при уменьшении амплитуды несущего колебания до $0,3U_{\text{мкр1}\Omega}$. Составьте таблицу сравнения коэффициентов модуляции при $U_m = 0,3U_{\text{мкр1}\Omega}$ и $U_m = 0,7U_{\text{мкр1}\Omega}$ при одинаковой амплитуде модулирующего колебания ($V_{p-p} = 2U_{\Omega} = U_{\Omega\text{макс}\Omega 0,7}$):

Параметр	$U_m, \text{В}$	
	$0,3U_{\text{мкр1}\Omega}$	$0,7U_{\text{мкр1}\Omega}$
M		

4.5. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) принципиальную схему амплитудного модулятора;
- 3) результаты расчетов, выполненных при подготовке к работе, в виде числовых значений, таблиц и графиков;
- 4) результаты эксперимента — название исследования, условия (числовые параметры), при которых проведены исследования; числовые значения, таблицы, графики, полученные при выполнении экспериментального задания, осциллограммы сигналов в виде скриншотов ИПУ осциллографа;
- 5) результаты обработки экспериментальных данных — таблицу значений и график ДМХ при $U_m = 0,7U_{\text{мкр1}\Omega}$, таблицу сравнения коэффициентов модуляции при различных значениях U_m ;
- 6) выводы, содержащие анализ результатов работы.

Контрольные вопросы

1. Что такое модуляция, АМ-колебание, огибающая АМ-колебания?
2. Как записывается математическая модель, как выглядит временная диаграмма однотонового АМ-колебания?
3. Как рассчитать и как изобразить графически спектр АМ-колебания: а) при однотоновой АМ; б) при сложном модулирующем сигнале?
4. Изобразите схему модулятора на полевом транзисторе с модуляцией смещением, поясните принцип работы.
5. Как необходимо выбирать полосу пропускания колебательного контура в нагрузке модулятора?
6. Можно ли получить хорошее качество огибающей АМ-колебания на выходе модулятора, если колебательный контур заменить сопротивлением?
7. Сформулируйте определение статической модуляционной характеристики.
8. Как рассчитать СМХ при полиномиальной аппроксимации?
9. Как рассчитать СМХ при кусочно-линейной аппроксимации?
10. Как следует выбирать рабочую точку модулятора?
11. Сформулируйте определение динамической модуляционной характеристики.
12. Как рассчитать ДМХ?
13. Как влияет на вид СМХ амплитуда несущего колебания на входе модулятора?
14. Как влияет на вид ДМХ амплитуда несущего колебания на входе модулятора?
15. Как рассчитать коэффициент модуляции по осциллограмме?

Лабораторная работа № 5

Детектирование амплитудно-модулированных сигналов

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — исследование физических процессов при детектировании амплитудно-модулированных сигналов транзисторным стоковым и диодным детекторами и изучение методов их математического описания. Ознакомление с принципами работы амплитудных детекторов и экспериментальное измерение их характеристик.

5.1. Теоретическая часть

Определение детектирования

Детектирование представляет собой процесс, обратный модуляции, при котором происходит восстановление низкочастотного сообщения, управляющего параметром высокочастотного несущего колебания. При амплитудном детектировании выделяется огибающая $U_m(t)$ несущего колебания, см. формулы (1.4), (1.5). Если на вход амплитудного детектора подать однтональное АМ-колебание

$$u_{\text{АМ}}(t) = U_m [1 + M \cos(\Omega t)] \cos(\omega t),$$

то сигнал на его выходе будет пропорционален огибающей

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) \sim U_m [1 + M \cos(\Omega t)],$$

или

$$u_{\text{вых}}(t) = U_{0\text{вых}} + U_{\Omega\text{вых}} \cos(\Omega t),$$

где $U_{0\text{вых}}$ — постоянная составляющая; $U_{\Omega\text{вых}}$ — амплитуда переменной составляющей. Эффективность работы детектора оценивается коэффициентом передачи (коэффициентом детектирования)

$$K_{\text{д}} = \frac{U_{\Omega\text{вых}}}{MU_m}. \quad (5.1)$$

Принцип работы стокового детектора

Пусть на вход детектора (рис. 5.1), т. е. между затвором и истоком транзистора, относительно некоторой рабочей точки $U_{\text{см}}$ подается АМ-колебание

$$u_{\text{вх}}(t) = u_{\text{зи}}(t) = U_{\text{см}} + U_m [1 + M \cos(\Omega t)] \cos(\omega t).$$

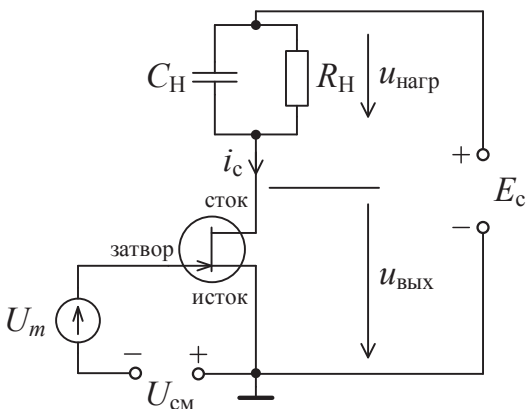


Рис. 5.1. Принципиальная схема стокового детектора

Пусть амплитуда колебания U_m мала и сток-затворная характеристика транзистора аппроксимирована полиномом 3-й сте-

пени (3.5). Как было показано в теоретической части лабораторной работы № 3 (см. с. 45), ток стока транзистора $i_c(t)$ в этом случае содержит постоянную составляющую и гармонические составляющие — см. формулу (3.8). Поскольку в данном случае амплитуда входного напряжения изменяется во времени с частотой модуляции Ω

$$U_m(t) = U_m [1 + M \cos(\Omega t)], \quad (5.2)$$

то, в соответствии с выражением (3.9), постоянная составляющая тока стока также будет изменяться во времени

$$I_0(t) = I_{0\text{const}} + KU_m^2 [1 + M \cos(\Omega t)]^2, \quad (5.3)$$

где $I_{0\text{const}}$ — составляющая, не зависящая от U_m ; K — некоторый коэффициент.

$$I_{0\text{const}} = a_0 + a_1 U_{\text{см}} + a_2 U_{\text{см}}^2 + a_3 U_{\text{см}}^3,$$

$$K = \frac{1}{2} a_2 + \frac{3}{2} a_3 U_{\text{см}}.$$

Возводя в квадрат выражение (5.3) в квадратных скобках, используя формулы (3.6) и раскрывая $\cos^2(\Omega t)$ в соответствии с выражением (3.7), получаем

$$\begin{aligned} I_0(t) = I_{0\text{const}} + K \left(1 + \frac{M^2}{2} \right) U_m^2 + \\ + 2KU_m^2 M \cos(\Omega t) + \frac{1}{2} KU_m^2 M^2 \cos(2\Omega t). \end{aligned} \quad (5.4)$$

В соответствии со схемой детектора (рис. 5.1) напряжение на его выходе

$$u_{\text{вых}}(t) = E_c - R_H I_0(t), \quad (5.5)$$

где R_H — сопротивление нагрузки. Подставив сюда формулу (5.4), получим

$$u_{\text{вых}}(t) = U_{0\text{вых}} - 2KR_H U_m^2 M \cos(\Omega t) - \frac{K}{2} R_H U_m^2 M^2 \cos(2\Omega t). \quad (5.6)$$

При этом емкость C_H (рис. 5.1) выбирается таким образом, чтобы ее сопротивление X_{C_H} было большим для токов с частотой Ω и малым для токов несущей частоты ω , т. е. необходимо, чтобы выполнялось неравенство

$$X_{C_H}(\omega) = \frac{1}{\omega C_H} \ll R_H \ll X_{C_H}(\Omega) = \frac{1}{\Omega C_H}.$$

Как видно из выражения (5.6), полезный эффект от детектирования пропорционален квадрату амплитуды входного напряжения U_m^2 , поэтому для *малых сигналов детектор является квадратичным*. Кроме того, в выражении (5.6) присутствует слагаемое с частотой 2Ω , т. о., квадратичное детектирование сопровождается нелинейными искажениями передаваемого сообщения. Вводя в рассмотрение коэффициент нелинейных искажений

$$K_H = \frac{\sqrt{U_{m2\Omega}^2 + U_{m3\Omega}^2 + \dots}}{U_{m\Omega}},$$

где $U_{m2\Omega}$, $U_{m3\Omega}$, ... — амплитуды составляющих с частотами 2Ω , 3Ω , ... и т. д.; $U_{m\Omega}$ — амплитуда составляющей с частотой Ω , можно видеть, что при квадратичном детектировании $K_H = M/4$ (искажения увеличиваются с ростом коэффициента модуляции) и при $M = 1$ коэффициент K_H составляет 25 %.

Если амплитуда колебания U_m на входе детектора велика и характеристика транзистора аппроксимирована кусочно-линейной функцией (3.12), то постоянная составляющая I_0 тока стока в этом случае определяется по выражению (3.13). Поскольку амплитуда входного напряжения меняется во времени в соответствии с выражением (5.2), то постоянная составляющая тока также будет изменяться во времени

$$I_0(t) = S U_m [1 + M \cos(\Omega t)] \gamma_0(\theta)$$

и напряжение на выходе детектора в соответствии с формулой (5.4) будет

$$u_{\text{вых}}(t) = E_c - SR_H U_m [1 + M \cos(\Omega t)] \gamma_0(\theta). \quad (5.7)$$

В свою очередь, коэффициент γ_0 также будет меняться во времени, поскольку изменяющаяся амплитуда $U_m(t)$ приведет к изменению угла отсечки θ в соответствии с выражением (3.15). Это вызовет искажения огибающей при детектировании. Если выбрать $U_{\text{см}} = U_H$, то в соответствии с формулой (3.15) $\cos \theta = 0$ при любом значении U_m , т. е. $\theta = 90^\circ$ и $\gamma_0(\theta) = 0,318$ независимо от $U_m(t)$, и выражение (5.7) для выходного напряжения приведем к виду

$$u_{\text{вых}}(t) = E_c - 0,318 SR_H U_m - 0,318 SR_H U_m M \cos(\Omega t).$$

Здесь амплитуды сигналов на входе и на выходе связаны прямой пропорциональностью, т. е. *детектирование является линейным*, при этом отсутствуют искажения передаваемого сообщения.

Качество воспроизведения огибающей АМ-колебания оценивают детекторной характеристикой, представляющей собой зависимость постоянного напряжения на нагрузке $U_{\text{нагр}}$ от амплитуды входного немодулированного напряжения U_m .

Для расчета детекторной характеристики используется закон Ома

$$U_{\text{нагр}} = R_H I_0, \quad (5.8)$$

где I_0 при аппроксимации характеристики полиномом 3-й степени определяется по выражению (3.9), а при кусочно-линейной аппроксимации — по выражениям (3.13)– (3.15) с учетом

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= 0, & \text{если } U_{\text{см}} < U_H \text{ и } U_m < (U_H - U_{\text{см}}) \\ I_0 &= S(U_{\text{см}} - U_H), & \text{если } U_{\text{см}} > U_H \text{ и } U_m < (U_{\text{см}} - U_H) \end{aligned} \right\}. \quad (5.9)$$

Данные выражения получаются из графических построений, показанных на рис. 5.2.

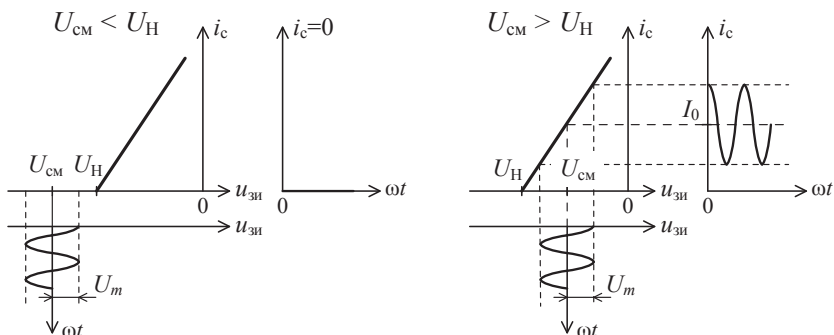


Рис. 5.2. Графические построения для кусочно-линейной аппроксимации при $U_m < |U_H - U_{CM}|$

Принцип работы диодного детектора

Диодный детектор (рис. 5.3) используется, как правило, при больших амплитудах входного сигнала, при этом вольт-амперная характеристика диода $i_d(u_d)$ аппроксимируется кусочно-линейной функцией

$$i_d = \begin{cases} 0, & u_d < 0, \\ Su_d, & u_d \geq 0, \end{cases} \quad (5.10)$$

где S — крутизна характеристики диода.

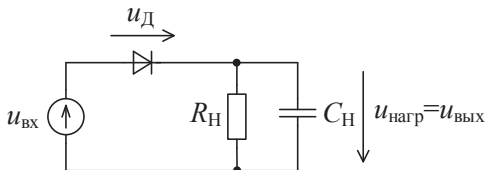


Рис. 5.3. Принципиальная схема диодного детектора

Работа диодного детектора показана на рис. 5.4. Если на вход подать АМ-сигнал, то отрицательные полуволны несущего ко-

лебания будут отсекаются диодом и емкость C_H будет быстро заряжаться через открытый диод во время действия положительных полуволн и медленно разряжаться через R_H в паузе между ними. В результате выходное напряжение на нагрузке детектора $u_{\text{вых}}(t)$ будет иметь вид пилообразной кривой с малой высотой зубцов, которая будет повторять огибающую АМ-сигнала.

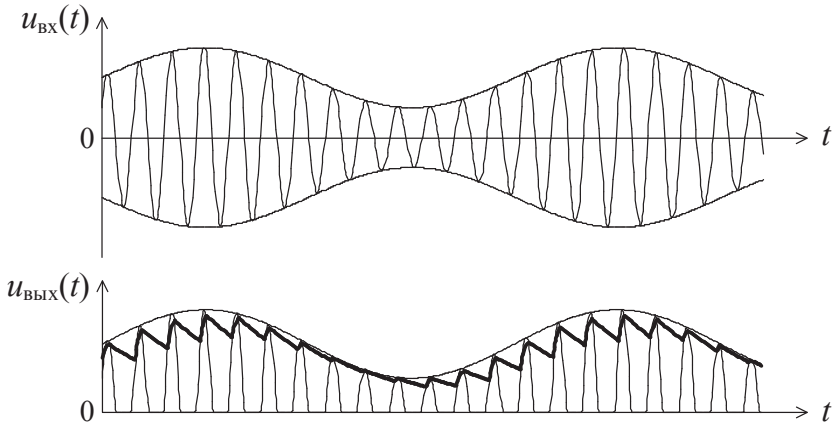


Рис. 5.4. Графики, поясняющие преобразование АМ-колебания диодным детектором

Для правильной работы детектора необходимо, чтобы сопротивление открытого диода было значительно меньше сопротивления нагрузки R_H , т.е. необходимо выполнение неравенства $SR_H \gg 1$, а постоянная времени цепи нагрузки τ_H должна удовлетворять условию

$$T_{\text{нес}} \ll \tau_H = R_H C_H \ll T_{\text{мод}},$$

где $T_{\text{нес}}$ — период несущего колебания, $T_{\text{нес}} = 2\pi/\omega = 1/f_{\text{нес}}$; $T_{\text{мод}}$ — период модулирующего колебания, $T_{\text{мод}} = 2\pi/\Omega = 1/F_{\text{мод}}$. Оптимальное значение емкости нагрузки рассчитывается по формуле

$$C_{H_{\text{опт}}} = \frac{1}{R_H} \sqrt{T_{\text{мод}} T_{\text{нес}}} = \frac{1}{R_H \sqrt{F_{\text{мод}} f_{\text{нес}}}}, \quad (5.11)$$

где $F_{\text{мод}}$ и $f_{\text{нес}}$ — модулирующая и несущая частоты, выраженные в герцах.

При аналитическом описании диодный детектор, в отличие от транзисторного, нельзя рассматривать как типовое радиотехническое звено (см. рис. 3.1), поскольку напряжение, прикладываемое к диоду, в соответствии с законом Кирхгофа равно разности входного напряжения и напряжения на нагрузке (см. рис. 5.3):

$$u_d(t) = u_{\text{вх}}(t) - u_{\text{нагр}}(t).$$

Если к входу приложено немодулированное напряжение $u_{\text{вх}}(t) = U_m \cos(\omega t)$, то на нагрузке выделится постоянное напряжение $U_{\text{нагр}}$. Таким образом,

$$u_d(t) = U_m \cos(\omega t) - U_{\text{нагр}} = U_{\text{см}} + U_m \cos(\omega t),$$

(т. е. напряжение на нагрузке является отрицательным напряжением смещения для диода, $U_{\text{см}} = -U_{\text{нагр}}$), и в соответствии с выражением (3.15), учитывая, что $U_H = 0$, см. формулы (3.12) и (5.10), получаем

$$\cos \theta = \frac{U_{\text{нагр}}}{U_m} = K_d, \quad (5.12)$$

где K_d — коэффициент передачи детектора, см. формулу (5.1). Поскольку $U_{\text{нагр}} \approx U_m$, то $K_d = \cos \theta \approx 1$, т. е. угол отсечки θ в диодном детекторе близок к нулю. В соответствии с формулами (5.8) и (3.13)

$$U_{\text{нагр}} = R_H I_0 = S R_H U_m \gamma_0(\theta).$$

Приравнивая данное выражение значению $U_{\text{нагр}}$ из формулы (5.12) и используя выражение (3.14) для $\gamma_0(\theta)$, получаем трансцендентное уравнение

$$U_m \cos \theta = SR_H U_m \gamma_0(\theta) = SR_H U_m \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\pi},$$

которое преобразуется к виду

$$\frac{\pi}{SR_H} = \operatorname{tg} \theta - \theta.$$

Учитывая, что при малых θ $\operatorname{tg} \theta \approx \theta + \theta^3/3$, получаем

$$\theta, \text{ рад} = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{SR_H}}. \quad (5.13)$$

Таким образом, угол отсечки в диодном детекторе зависит только от параметров диода и нагрузки, и поэтому детекторная характеристика $U_{\text{нагр}}(U_m)$, определяемая в соответствии с выражением (5.12), получается линейной.

5.2. Домашнее задание

В работе используются результаты домашнего задания, полученные в лабораторной работе № 3 (см. с. 56). Пример выполнения расчетов приведен в прил. 9.

1. Изобразите принципиальные схемы стокового детектора на полевом транзисторе и диодного детектора.

2. Рассчитайте детекторную характеристику стокового детектора $U_{\text{нагр}}(U_m)$ при аппроксимации характеристики транзистора полиномом 3-й степени для $U_{\text{см}} = U_{\text{см1}}$, используя выражения (5.8), (3.9), при этом примите $R_H = 2$ кОм. Значения U_m изменяйте от 0 до тех пор, пока результирующее напряжение $u_{\text{зи}} = U_{\text{см}} \pm U_m$ не выйдет за пределы участка, на котором выполнена аппроксимация, выбирая шаг таким образом, чтобы рассчитать от 8 до 12 точек. Расчеты оформите в виде таблицы:

$U_m, \text{ В}$	0									
$U_{\text{нагр}}, \text{ В}$										

3. Рассчитайте детекторные характеристики стокового детектора $U_{\text{нагр}}(U_m)$ при кусочно-линейной аппроксимации характеристики транзистора для $U_{\text{см}} = U_{\text{см1}}$ и $U_{\text{см}} = U_{\text{см2}}$, используя выражения (5.8), (3.13)–(3.15) и учитывая (5.9). При этом примите $R_H = 2$ кОм. Значения U_m изменяйте от 0 до тех пор, пока не выполнится одно из условий: либо $U_m \geq |U_{\text{см}}|$, либо $U_{\text{нагр}} \geq E_c$ ($E_c \approx 11,5$ В), выбирая шаг таким образом, чтобы рассчитать от 8 до 12 точек. Расчеты оформите в виде таблиц:

U_m , В	0									
$\cos\theta$										
θ , град										
$\gamma_0(\theta)$										
$U_{\text{нагр}}$, В										

4. Постройте графики рассчитанных детекторных характеристик (3 графика).

5. Считая, что вольт-амперная характеристика диода аппроксимирована кусочно-линейной функцией (5.10) с крутизной $S = 10^{-2}$ А/В, рассчитайте углы отсечки (в градусах, θ , град = θ , рад $\cdot [180/\pi]$) и коэффициенты передачи диодного детектора для $R_H = 10$ кОм и $R_H = 1$ кОм, используя формулы (5.13), (5.12).

6. Рассчитайте оптимальное значение емкости $C_{\text{Нопт}}$ диодного детектора для детектирования АМ-колебания с несущей частотой, равной заданной частоте f_p (см. прил. 4), и частотой модуляции 200 Гц, используя выражение (5.11), если $R_H = 10$ кОм.

7. Для диодного детектора изобразите графики напряжения на выходе $u_{\text{вых}}(t)$: при а) $C_H = C_{\text{Нопт}}$; б) $C_H > C_{\text{Нопт}}$; в) $C_H < C_{\text{Нопт}}$, если на вход подается однтональное АМ-колебание.

8. Ознакомьтесь с экспериментальным заданием.

5.3. Экспериментальное задание

Работа выполняется на базе лабораторной станции NI ELVIS, описание которой приведено в прил. 3, 6. На макетную плату устанавливается модуль «Нелинейные цепи», описание которого приведено в лабораторной работе № 2 (см. с. 34).

1. Подготовка к исследованиям.

Включите питание компьютера, дождитесь загрузки операционной системы и служебных программ.

Включите системное питание рабочей станции NI ELVIS выключателем на задней панели.

Установите переключатель «COMMUNICATIONS» на передней панели рабочей станции NI ELVIS в положение «NORMAL».

Включите программный режим управления регулируемыми источниками и функциональным генератором, установив переключатели «MANUAL» на передней панели рабочей станции в нижнее положение.

2. Исследование транзисторного стокового детектора.

2.1. Соберите схему стокового детектора (см. рис. 5.1):

- подключите исток транзистора к общей шине с помощью перемычки $J5$;
- в цепь стока подключите резистор $R3$, используя перемычку $J4$;
- подключите параллельно $R3$ конденсатор $C3$ при помощи перемычки $J3$.

2.2. Включите питание макетной платы выключателем «PROTOTYPING BOARD POWER» на передней панели рабочей станции NI ELVIS, запустите программное обеспечение NI ELVIS, дождитесь инициализации системы, откройте следующие приборы:

- цифровой мультиметр Digital Multimeter (в ответ на появившееся сообщение «For maximum accuracy, use the DMM nulling...» нажмите **OK**);

- функциональный генератор Function Generator;
 - регулируемые источники питания Variable Power Supplies.
- Расположите ИПУ приборов на экране так, чтобы они не перекрывались.

2.3. Снимите зависимость постоянного напряжения на выходе детектора $U_{\text{вых}}$ от амплитуды входного немодулированного колебания U_m для $U_{\text{см}} = U_{\text{см1}}$, для этого:

- на ИПУ генератора в поле ввода-вывода **Frequency** введите с клавиатуры заданное значение частоты f_p (см. прил. 4), если в поле частоты отображается «OFF», щелкните по кнопке **On**; дождитесь, когда в поле частоты появится введенное значение (с некоторой погрешностью) и погаснет надпись «*TUNING*» (при этом в выпадающем списке «Tuning Mode» должно быть установлено значение «UltraFine»); в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** введите с клавиатуры значение 0 В;
- соедините гнезда «Вольтм» и «U_см» исследуемого модуля; на ИПУ регулируемых источников установите значение отрицательного напряжения SUPPLY–, равное $U_{\text{см1}}$; измерьте установленное значение мультиметром, отклонение не должно превышать (± 5) %; измерьте мультиметром ЭДС стокового питания E_c и напряжение на стоке $U_{\text{вых}}$, соединяя гнездо «Вольтм» поочередно с гнездами «E_с» и «U_вых»; вычислите ток стока $i_c = (E_c - U_{\text{вых}})/R3$, где $R3 = 2 \text{ кОм}$; убедитесь, что значению $U_{\text{см1}}$ соответствует значение $i_c = 2,7...3 \text{ мА}$, при несоответствии подкорректируйте $U_{\text{см1}}$ в небольших пределах;
- соедините гнезда «Вольтм» и «U_вых» исследуемого модуля;
- вводя с клавиатуры в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора значения от 0 до 2,5 В с шагом 0,2–0,3 В, снимите зависимость постоянного напряжения на выходе детектора $U_{\text{вых}}$ (по мультиметру) от амплитуды входного колебания U_m (установленной в поле **Peak Amplitude**);

- убедитесь, что имеет место эффект детектирования, т. е. изменение постоянного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ при изменении U_m , при этом $|\Delta U_{\text{ВЫХ}}|/\Delta U_m \geq 1$ по крайним точкам зависимости $U_{\text{ВЫХ}}(U_m)$.

2.4. Снимите зависимость $U_{\text{ВЫХ}}(U_m)$ для $U_{\text{СМ}} = U_{\text{СМ}2}$, для этого:

- на ИПУ регулируемых источников установите значение отрицательного напряжения SUPPLY–, равное $U_{\text{СМ}2}$;
- повторите измерения аналогично п. 2.3 для $U_{\text{СМ}2}$, при этом убедитесь, что значению $U_{\text{СМ}2}$ соответствует ток стока $i_c = 0,2...0,4$ мА при нулевом значении в поле **Peak Amplitude** на ИПУ генератора; при несоответствии подкорректируйте $U_{\text{СМ}2}$ в небольших пределах.

2.5. Исследуйте детектор в режиме детектирования АМ-колебаний.

В качестве источника модулирующего колебания используется внешний генератор GFG-8215A (или SFG-2110).

- Закройте ИПУ цифрового мультиметра; откройте двухканальный осциллограф Oscilloscope, используя панель запуска приборов «ELVIS — Instrument Launcher», расположите ИПУ приборов на экране так, чтобы они не перекрывались;
- включите отображение обоих каналов осциллографа кнопками **Display ON/OFF** и режим измерения параметров сигнала в обоих каналах кнопками **MEAS**; на вход канала А подайте напряжение с выхода генератора, выбрав в выпадающем списке **Source** канала А значение «ACH1», а на вход канала В — выходное напряжение детектора, выбрав в выпадающем списке **Source** канала В значение «ACH0»; установите длительность развертки **TIMEBASE** 10 мкс/дел.;
- на ИПУ регулируемых источников установите значение отрицательного напряжения SUPPLY–, равное $U_{\text{СМ}2}$; в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора введите с клавиатуры значение 0,5 В; убедитесь, что в ка-

нале А осциллографа наблюдается гармонический сигнал с установленной частотой и амплитудой;

- подключите источник модулирующего напряжения, для этого соедините штекер «земля» (черный) кабеля внешнего генератора GFG-8215A с гнездом «BANANA D» макетной платы NI ELVIS PROTOTYPING BOARD, а сигнальный штекер (красный) — с гнездом «BANANA C»;
- установите регуляторы генератора GFG-8215A «DUTY», «CMOS», «OFFSET», «AMPL» в нажатое положение; регулятор «AMPL» поверните в положение примерно $2/3$ от максимума; включите питание генератора GFG-8215A кнопкой «POWER»; выберите тип сигнала «синусоида» нажатием соответствующей кнопки; установите частоту сигнала 200 Гц, для этого нажмите кнопку «100» и установите ручку «FREQUENCY» в положение «2»;
- на ИПУ осциллографа установите длительность развертки **TIMEBASE** 2 мс/дел.; расположите с помощью регуляторов «Position» сигнал канала А в верхней части экрана, а сигнал канала В — в нижней, выбрав масштабы **VERTICAL/Scale** так, чтобы каждый сигнал занимал от $1/3$ до $1/2$ экрана; в качестве источника синхронизации **TRIGGER/Source** выберите «CH В» (или «Immediate»); убедитесь, что в канале А наблюдается АМ-колебание с коэффициентом модуляции от 50 до 60 % (см. рис. 2.4 и формулу (2.13), с. 42, при необходимости подкорректируйте ручкой «AMPL» генератора GFG-8215A), а в канале В — продетектированное колебание, близкое к гармоническому с частотой $200 (\pm 10)$ Гц (при необходимости подкорректируйте ручкой «FREQUENCY» GFG-8215A); скопируйте (<Alt>+<PrintScreen>) и вставьте в файл (<Ctrl>+<V>) ИПУ осциллографа;
- в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора введите с клавиатуры значение 2,0 В; измените масштабы **VERTICAL/Scale** на ИПУ осциллографа соответствен-

но уровням сигналов; скопируйте и вставьте в файл ИПУ осциллографа;

- в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора введите с клавиатуры значение 0,5 В; отключите конденсатор $C3$ с помощью переключки $J3$; измените масштабы **VERTICAL/Scale** на ИПУ осциллографа соответственно уровням сигналов; скопируйте и вставьте в файл ИПУ осциллографа.

3. Исследование диодного детектора.

Используются открытые в предыдущих пунктах ИПУ приборов (осциллограф, генератор, регулируемые источники) и внешний генератор GFG-8215A (или SFG-2110).

3.1. Снимите зависимость постоянного напряжения на нагрузке $U_{\text{нагр}}$ от действующего значения входного немодулированного колебания $U_{\text{RMSвх}}$, для этого:

- соберите схему диодного детектора (см. рис. 5.3) с сопротивлением нагрузки $R_{\text{H}} = R2 = 10 \text{ кОм}$ и емкостью нагрузки $C_{\text{H}} = C2 = 47 \text{ нФ}$, используя переключки $J1$ ($R1$ отключите от схемы) и $J2$;
- выключите внешний генератор GFG-8215A кнопкой «POWER»; в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора NI ELVIS введите с клавиатуры значение 2,0 В; на вход канала А осциллографа подайте входное напряжение детектора, выбрав на ИПУ в выпадающем списке **Source** канала А значение «ACH1», а на вход канала В — напряжение нагрузки, выбрав в выпадающем списке **Source** канала В значение «BNC/Board CH В»; установите длительность развертки **TIMEBASE** 10 мкс/дел.; в качестве источника синхронизации **TRIGGER/Source** выберите «CH А»;
- установите масштабы **VERTICAL/Scale** на ИПУ осциллографа в канале А 1 В/дел., а в канале В 500 мВ/дел.; расположите с помощью регуляторов «Position» сигнал канала А в верхней части экрана, а сигнал канала В в нижней; убедитесь, что в канале А осциллографа наблюдается

гармонический сигнал с частотой, установленной в поле **Frequency** на ИПУ генератора, равной заданной частоте f_p , и амплитудой 2,0 В (± 10) %, а в канале В — положительное постоянное напряжение (изолиния и выше нее постоянный уровень) с небольшими колебаниями;

- вводя с клавиатуры в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора значения от 0 до 2,5 В с шагом 0,2—0,3 В, снимите зависимость постоянного напряжения на нагрузке детектора $U_{\text{нагр}} = RMS$ в канале В осциллографа от действующего значения входного колебания $U_{RMS\text{вх}} = RMS$ в канале А.

3.2. Исследуйте детектор при различных сопротивлениях нагрузки:

- в поле ввода-вывода **Peak Amplitude** на ИПУ генератора введите с клавиатуры значение 2,5 В; измерьте действующее значение $U_{RMS\text{вх}} = RMS$ в канале А осциллографа в отсутствие модуляции (для последующего расчета K_d); включите внешний генератор GFG-8215А кнопкой «POWER»; выберите тип сигнала GFG-8215А «синусоида» нажатием соответствующей кнопки; установите частоту 200 Гц, выбрав соответствующий диапазон нажатием кнопки «100» и установив ручку «FREQUENCY» в положение «2»;
- на ИПУ осциллографа установите длительность развертки **TIMEBASE** 2 мс/дел.; масштабы **VERTICAL/Scale** в канале А 2 В/дел., в канале В 1 В/дел.; в выпадающем списке «Coupling» канала В выберите значение «АС»; расположите сигнал канала А в верхней части экрана, а сигнал канала В в нижней; убедитесь, что в канале А наблюдается АМ-колебание с коэффициентом модуляции от 50 до 60 %, а в канале В — продетектированное колебание, близкое к гармоническому с частотой 200 (± 10) Гц; измерьте действующее значение напряжения на нагрузке $U_{RMS\text{нагр}} = RMS$ в канале В; скопируйте ($\langle \text{Alt} \rangle + \langle \text{PrintScreen} \rangle$) и вставьте в файл ($\langle \text{Ctrl} \rangle + \langle \text{V} \rangle$) ИПУ осциллографа;

- подключите к нагрузке детектора резистор $R1$ с помощью переключки $J1$, при этом $R_H = R1 \parallel R2 = 1 \text{ кОм}$, и емкость $C_H = C1 = 470 \text{ нФ}$ с помощью переключки $J2$; измерьте действующее значение напряжения на нагрузке $U_{RMSнагр} = RMS$ в канале В; скопируйте ($\langle \text{Alt} \rangle + \langle \text{PrintScreen} \rangle$) и вставьте в файл ($\langle \text{Ctrl} \rangle + \langle \text{V} \rangle$) ИПУ осциллографа.

3.3. Исследуйте детектор при различных емкостях нагрузки:

- отключите резистор $R1$, используя переключку $J1$, при этом $R_H = R2 = 10 \text{ кОм}$;
- подключите к нагрузке детектора емкость $C_H = C1 = 470 \text{ нФ}$, используя переключку $J2$; скопируйте и вставьте в файл ИПУ осциллографа;
- отключите от нагрузки конденсаторы $C1$ и $C2$ (при этом $C_H = 0$), используя переключку $J2$; скопируйте и вставьте в файл ИПУ осциллографа;
- подключите к нагрузке детектора емкость $C_H = C2 = 47 \text{ нФ}$, используя переключку $J2$; скопируйте и вставьте в файл ИПУ осциллографа.

5.4. Обработка результатов

По результатам п. 2.3 и 2.4 экспериментального задания рассчитайте детекторные характеристики $U_{нагр}(U_m)$ стокового детектора для $U_{см} = U_{см1}$ и $U_{см} = U_{см2}$, где $U_{нагр} = U_{вых0} - U_{вых}$, $U_{вых0}$ — напряжение на выходе детектора при $U_m = 0$. Результаты оформите в виде таблиц:

$U_m, \text{ В}$	0									
$U_{вых}, \text{ В}$										
$U_{нагр}, \text{ В}$										

Постройте графики детекторных характеристик $U_{нагр}(U_m)$ стокового детектора для $U_{см} = U_{см1}$ и $U_{см} = U_{см2}$.

По результатам п. 3.1 экспериментального задания рассчитайте детекторную характеристику $U_{\text{нагр}}(U_m)$ диодного детектора, где $U_m = \sqrt{2}U_{\text{RMS вх}}$. Результаты оформите в виде таблицы:

$U_{\text{RMS вх}}, \text{ В}$	0									
$U_m, \text{ В}$	0									
$U_{\text{нагр}}, \text{ В}$	0									

Постройте график детекторной характеристики $U_{\text{нагр}}(U_m)$ диодного детектора.

По результатам п. 3.2 экспериментального задания рассчитайте коэффициенты передачи диодного детектора K_d для $R_H = R_2 = 10 \text{ кОм}$ и $R_H = R_1 \parallel R_2 = 1 \text{ кОм}$, $K_d = U_{\text{RMS нагр}}/(MU_{\text{RMS вх}})$, где $U_{\text{RMS нагр}}$ — действующее значение напряжения на нагрузке; M — коэффициент модуляции, определяется по осциллограмме, см. рис. 2.4 и формулу (2.13) на с. 42–43; $U_{\text{RMS вх}}$ — действующее значение входного напряжения в отсутствие модуляции. Составьте таблицу сравнения расчетных и экспериментальных значений K_d :

	K_d	
	$R_H = 10 \text{ кОм}$	$R_H = 1 \text{ кОм}$
Расчет		
Эксперимент		

5.5. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) принципиальные схемы транзисторного стокового и диодного детекторов;
- 3) результаты расчетов, выполненных при подготовке к работе, в виде числовых значений, таблиц и графиков;

- 4) результаты эксперимента — название исследования; условия (числовые параметры), при которых проведены исследования; числовые значения, таблицы (можно совместить с обработкой результатов), полученные при выполнении экспериментального задания; осциллограммы сигналов в виде скриншотов ИПУ осциллографа;
- 5) результаты обработки экспериментальных данных — таблицы значений и графики детекторных характеристик, расчет K_d , таблицу сравнения расчетных и экспериментальных значений K_d ;
- 6) выводы, содержащие анализ результатов работы.

Контрольные вопросы

1. Что называется детектированием, какой вид имеет сигнал на выходе амплитудного детектора?
2. Сформулируйте определение коэффициента передачи (коэффициента детектирования) амплитудного детектора.
3. Изобразите схему стокового детектора, поясните назначение элементов и принцип работы.
4. Изобразите схему диодного детектора, поясните назначение элементов и принцип работы.
5. В чем различие стокового и диодного детекторов?
6. В каком случае имеет место квадратичное детектирование, в каком — линейное? В чем недостаток квадратичного детектирования?
7. Сформулируйте определение детекторной характеристики.
8. Как рассчитать и какой вид имеет детекторная характеристика стокового детектора при малых входных сигналах?
9. Как рассчитать и какой вид имеет детекторная характеристика стокового детектора при больших входных сигналах?

10. Как выбрать емкость нагрузки стокового детектора?
11. Как выбрать параметры нагрузки R_H и C_H диодного детектора?
12. Чем определяется угол отсечки в диодном детекторе?
13. Как рассчитать и какой вид имеет детекторная характеристика диодного детектора.
14. Как изменится коэффициент передачи диодного детектора при увеличении, уменьшении сопротивления нагрузки R_H ?
15. Изобразите график напряжения на выходе диодного детектора, если на вход подается однотональное АМ-колебание: а) при правильно выбранной C_H ; б) при слишком большой C_H ; в) при отсутствии C_H .

Лабораторная работа № 6

Исследование LC -автогенератора с трансформаторной обратной связью

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — экспериментальное исследование основных характеристик LC -автогенератора с трансформаторной обратной связью и проверка методов математического описания автогенераторов.

6.1. Теоретическая часть

Автогенератором называется устройство, преобразующее энергию источника питания с помощью управляемого элемента, например транзистора, в энергию периодических колебаний при отсутствии внешнего периодического воздействия.

Цепи с обратной связью

Автогенератор является примером электрической цепи с обратной связью, общая структурная схема которой показана на рис. 6.1. В таких цепях часть выходного сигнала подается на вход. Цепь с обратной связью состоит из двух звеньев:

- основного звена с передаточной характеристикой $K(p)$, содержащего активные элементы;
- звена обратной связи с передаточной характеристикой $\beta(p)$, состоящего, как правило, из пассивных элементов.

$$U_{\text{вых}}(p) = K(p)[U_{\text{вх}}(p) + \beta(p)U_{\text{вых}}(p)], \quad (6.1)$$

где $U_{\text{вх}}(p)$ и $U_{\text{вых}}(p)$ — изображения по Лапласу входного и выходного сигналов. В таком случае передаточная характеристика цепи с обратной связью

$$K^{\text{oc}}(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{K(p)}{1 - \beta(p)K(p)}.$$

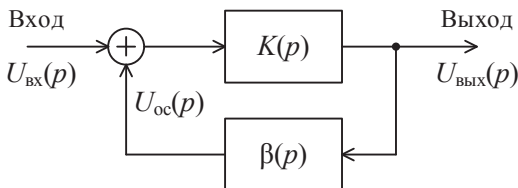


Рис. 6.1. Структурная схема цепи с обратной связью

Комплексный коэффициент передачи такой цепи

$$K^{\text{oc}}(j\omega) = K^{\text{oc}}(p) \Big|_{p=j\omega} = \frac{K(j\omega)}{1 - \beta(j\omega)K(j\omega)}.$$

Различают отрицательную обратную связь (ООС) и положительную обратную связь (ПОС). При ООС сигнал обратной связи $U_{\text{ос}}$ подается на вход системы в противофазе с выходным $U_{\text{вых}}$, при этом

$$|1 - \beta(j\omega)K(j\omega)| > 1.$$

Таким образом, ООС уменьшает коэффициент передачи цепи

$$|K^{\text{оос}}(j\omega)| < |K(j\omega)|.$$

ООС используется в электрических цепях для решения следующих задач:

- формирования требуемой частотной характеристики;
- стабилизации коэффициента усиления;
- уменьшения коэффициента нелинейных искажений в усилителях.

При ПОС сигнал обратной связи U_{oc} подается на вход системы в фазе с выходным $U_{вых}$, при этом

$$|1 - \beta(j\omega)K(j\omega)| < 1,$$

т. е. ПОС увеличивает коэффициент передачи цепи

$$|K^{пос}(j\omega)| > |K(j\omega)|$$

и может привести к самовозбуждению системы, когда в цепи возникают колебания в отсутствие внешнего входного сигнала, т. е. при $U_{вх} = 0$. Этот эффект используется в автогенераторах.

Автогенератор с трансформаторной обратной связью. Условие возникновения колебаний

Простейший автогенератор гармонических колебаний представляет собой резонансный усилитель, в котором часть напряжения с колебательного контура подается на вход (рис. 6.2), для этого используется катушка связи $L_{св}$.

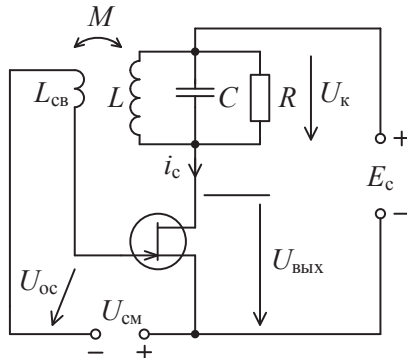


Рис. 6.2. Принципиальная схема автогенератора с трансформаторной обратной связью

Колебательный контур, включенный в цепи стока транзистора и представленный параллельной схемой замещения с индуктивностью L , емкостью C и сопротивлением R , имеет следующие параметры:

- резонансная частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

- резонансное сопротивление

$$R_{oe} = Z_k(\omega_0) = R,$$

где $Z_k(\omega)$ — полное сопротивление контура,

- добротность

$$Q = \frac{R}{\sqrt{L/C}} \gg 1.$$

Для возникновения автоколебаний необходимо, чтобы обратная связь была положительной и при этом выполнялось условие

$$K_{yc} K_{oc} > 1, \quad (6.2)$$

где K_{yc} — коэффициент усиления усилителя в режиме малого сигнала,

$$K_{yc} = S_{диф} R.$$

Здесь $S_{диф}$ — дифференциальная крутизна характеристики транзистора в рабочей точке, определяемая по формуле (2.3), см. теоретическую часть лабораторной работы № 2, с. 25.

K_{oc} — коэффициент обратной связи,

$$K_{oc} = \frac{U_{oc}}{U_k} = \frac{M}{L},$$

где U_{oc} — напряжение обратной связи; U_k — напряжение на контуре; M — взаимная индуктивность между индуктивностью связи $L_{св}$ и индуктивностью контура L (см. рис. 6.2).

При выполнении вышеописанных условий в контуре возникнут колебания

$$u_{\kappa}(t) = Ae^{-\alpha t} \cos(\omega_{\kappa} t + \varphi), \quad (6.3)$$

где амплитуда A и начальная фаза φ зависят от начальных условий, а частота колебаний

$$\omega_{\kappa} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}.$$

Коэффициент α рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{\omega_0}{2Q} (1 - K_{\text{yc}} K_{\text{oc}}). \quad (6.4)$$

При высокочастотном контуре, когда $Q \gg 1$, частота колебаний будет примерно совпадать с резонансной частотой контура

$$\omega_{\kappa} \approx \omega_0.$$

Если выполняется условие самовозбуждения (6.2), то коэффициент α согласно формуле (6.4) будет отрицательным, $\alpha < 0$, при этом амплитуда колебаний на контуре, см. выражение (6.3), будет экспоненциально нарастать.

Режим большого сигнала. Стационарный режим работы автогенератора

Возрастание амплитуды колебаний делает необходимым учет нелинейности характеристики транзистора. Выходное напряжение автогенератора в схеме рис. 6.2

$$u_{\text{вых}}(t) = E_c - u_{\kappa}(t) \approx E_c - U_{1m} \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где U_{1m} — нарастающая во времени амплитуда первой гармоники выходного напряжения, $U_{1m} = U_{1m}(t)$.

Напряжение между затвором и истоком транзистора

$$u_{\text{зи}}(t) = U_{\text{см}} + u_{\text{ос}}(t) = U_{\text{см}} + U_m \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где U_m — амплитуда напряжения, подаваемого на вход усилителя,

$$U_m = K_{\text{ос}} U_{1m}. \quad (6.5)$$

При больших амплитудах U_m , когда необходимо учитывать нелинейный характер сток-затворной характеристики транзистора $i_c(u_{\text{зи}})$, ток стока

$$i_c(t) = I_0 + I_{1m} \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + I_{2m} \cos(2\omega_0 t + \varphi_2) + \dots,$$

где постоянная составляющая I_0 и амплитуды гармоник I_{1m} , I_{2m} зависят от амплитуды входного напряжения U_m — см. теоретическую часть работы № 3, с. 45. Вклад в напряжение на контуре будет давать только первая гармоника тока с частотой ω_0 , т. к. сопротивление контура $Z_k(\omega)$ для нее велико, $Z_k(\omega_0) = R$, а для остальных составляющих $Z_k(2\omega_0)$, $Z_k(3\omega_0)$, ... ≈ 0 . Следовательно, для анализа режима большого сигнала можно применить квазилинейный метод, при этом все параметры усилителя (автогенератора) приводятся к первой гармонике. Крутизна по первой гармонике

$$S_1(U_m) = \frac{I_{1m}(U_m)}{U_m}$$

зависит от амплитуды входного напряжения U_m , а значит, и от амплитуды первой гармоники выходного напряжения U_{1m} — см. формулу (6.5).

Процесс установления колебаний в автогенераторе при определенном виде зависимости $S_1(U_m)$ описывается дифференциальным уравнением [1]. В стационарном режиме, когда амплитуда U_{1m} перестанет изменяться и примет установившееся значение, будет справедливо равенство

$$U_{1m} = I_{1m}(U_m)R = S_1(U_m)U_m R = S_1(U_m)K_{oc}U_{1m}R.$$

Сокращая обе части на U_{1m} , получим, что в стационарном режиме

$$K_1(U_m)K_{oc} = 1, \quad (6.6)$$

где $K_1(U_m)$ — коэффициент усиления по первой гармонике, зависящий от амплитуды входного напряжения U_m ,

$$K_1(U_m) = \frac{U_{1m}}{U_m} = S_1(U_m)R.$$

Мягкий и жесткий режимы самовозбуждения

Процесс установления колебаний в автогенераторе можно проиллюстрировать с использованием графика колебательной характеристики резонансного усилителя, т. е. зависимости $U_{1m}(U_m)$. Колебательная характеристика при монотонной зависимости $S_1(U_m)$ показана на рис. 6.3.

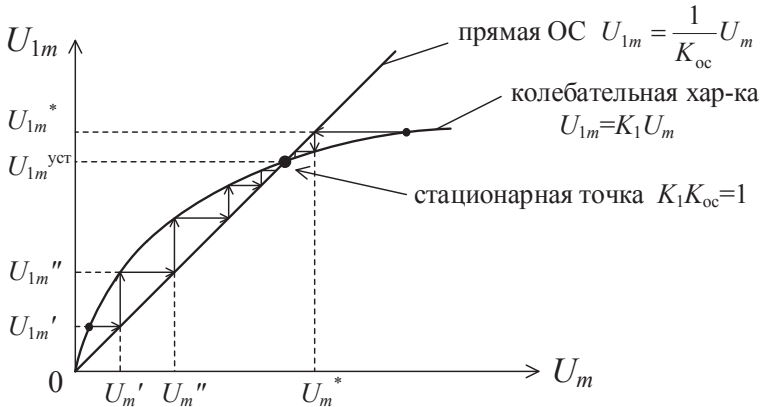


Рис. 6.3. Графики, поясняющие процесс установления колебаний при монотонной зависимости $S_1(U_m)$ (мягкий режим самовозбуждения)

На этом же графике показана прямая обратной связи, описываемая уравнением

$$U_{1m} = \frac{1}{K_{oc}} U_m.$$

Как видно из рис. 6.3, при малых амплитудах $U_m \approx 0$ график колебательной характеристики проходит выше прямой обратной связи, при этом выполняется условие самовозбуждения (6.2), т. е. $K_{yc} = K_1(U_m \approx 0) > 1/K_{oc}$. Пусть в контуре, а соответственно и на выходе усилителя каким-то образом, например за счет тепловых шумов, возникли колебания с амплитудой U_{1m}' , эти колебания передадутся на вход усилителя через цепь обратной связи с амплитудой U_m' , будут усилены до амплитуды на контуре U_{1m}'' , которой будет соответствовать амплитуда на входе U_m'' . Так будет происходить до тех пор, пока амплитуда напряжения на контуре не примет установившееся значение $U_{1m}^{уст}$ в стационарной точке, в которой график колебательной характеристики и прямая обратной связи пересекаются, при этом выполняется условие (6.6). Данный режим самовозбуждения автогенератора называется мягким.

Если амплитуда напряжения на контуре превысит установившееся значение $U_{1m}^{уст}$ в стационарной точке и станет равной U_{1m}^* , то на входе усилителя ей будет соответствовать значение U_m^* за счет цепи обратной связи, которое, проходя через усилитель, вызовет понижение амплитуды напряжения на контуре. Таким образом, амплитуда напряжения на контуре вернется к установившемуся значению $U_{1m}^{уст}$, т. е. стационарная точка будет устойчивой.

При немонотонной зависимости $S_1(U_m)$ колебательная характеристика усилителя $U_{1m} = K_1 U_m$ будет иметь вид, показанный на рис. 6.4. В этом случае будут наблюдаться две стационарные точки, в которых выполняется условие (6.6). Однако, если в контуре возникнут колебания с амплитудой $U_{1m}' < U_{1m}^1$, где U_{1m}^1 — амплитуда колебаний на контуре в стационарной

точке 1, то они будут затухать, т. к. в этом случае колебательная характеристика проходит ниже прямой обратной связи, $K_{yc} = K_1 < 1/K_{oc}$, т. е. условие самовозбуждения (6.2) не выполняется. Если в контуре возникнут колебания с амплитудой $U_{1m} > U_{1m}^1$, то их амплитуда начнет увеличиваться аналогично рассмотренной выше на рис. 6.3 ситуации до значения U_{1m}^2 , соответствующего стационарной точке 2. При превышении этого значения, если $U_{1m} > U_{1m}^2$, произойдет возврат в стационарную точку 2. Таким образом, стационарная точка 2 будет устойчивой, а стационарная точка 1 — неустойчивой. Такой режим самовозбуждения автогенератора называется жестким.

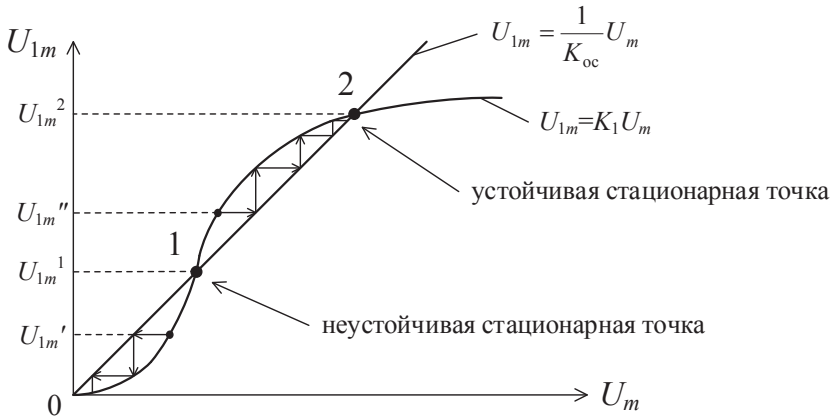


Рис. 6.4. Графики, поясняющие процесс установления колебаний при немонотонной зависимости $S_1(U_m)$ (жесткий режим самовозбуждения)

Влияние ЭДС стокового питания

При анализе работы автогенератора необходимо учитывать, что рост амплитуды выходного напряжения U_{1m} будет ограничен ЭДС стокового питания E_c , т. е. транзистор будет работать

в режиме близком к перенапряженному, при этом $U_{1m} \approx E_c$. Такой режим является нежелательным, поскольку в перенапряженном режиме существенно искажается форма тока, в данном случае тока стока i_c , за счет влияния выходной характеристики транзистора $i_c(u_{сн})$, что приводит к повышению уровня высших гармоник с частотами $2\omega_0, 3\omega_0, \dots$, которые будут проникать на выход из-за ограниченной добротности контура. Поэтому в высокостабильных автогенераторах принимают меры, не допускающие работу в перенапряженном режиме, например, применяют цепи автоматического смещения, уменьшающие коэффициент усиления по мере роста U_{1m} .

Условие баланса амплитуд и баланса фаз

Если учесть, что произвольный автогенератор представляет собой цепь с обратной связью (см. рис. 6.1), при этом $U_{вх}(p) = 0$, то, заменяя $p = j\omega$ в формуле (6.1), можно записать уравнение стационарного режима произвольного автогенератора

$$K(j\omega)\beta(j\omega) = 1, \quad (6.7)$$

где $K(j\omega)$ — комплексный коэффициент передачи усилительного звена; $\beta(j\omega)$ — комплексный коэффициент передачи звена обратной связи. Представив данные функции в показательной форме, $K(j\omega) = K(\omega)e^{j\varphi_K(\omega)}$, где $K(\omega)$ и $\varphi_K(\omega)$ — АЧХ и ФЧХ усилительного звена; $\beta(j\omega) = \beta(\omega)e^{j\varphi_\beta(\omega)}$, где $\beta(\omega)$ и $\varphi_\beta(\omega)$ — АЧХ и ФЧХ звена обратной связи, равенство (6.7) можно записать в виде

$$K(\omega)\beta(\omega)e^{j[\varphi_K(\omega) + \varphi_\beta(\omega)]} = 1.$$

Для выполнения этого равенства необходимо выполнение двух условий — условия баланса амплитуд

$$K(\omega)\beta(\omega) = 1,$$

которое позволяет найти амплитуду колебаний в стационарном режиме, и условия баланса фаз

$$\varphi_K(\omega) + \varphi_B(\omega) = 2\pi n, \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

которое позволяет найти частоту колебаний.

6.2. Домашнее задание

1. Изучите раздел 6.1 «Теоретическая часть».
2. Ознакомьтесь с экспериментальным заданием.

6.3. Экспериментальное задание

Исследование автогенератора выполняется путем схемотехнического моделирования в программе Multisim. Дальнейшее описание приведено для версии Multisim 12.0. Запуск ПО Multisim выполняется из главного меню (**Пуск** → **Все программы** → **National Instruments** → **Circuit Design Suite 12.0** → **Multisim 12.0**) либо с помощью ярлыка на рабочем столе, либо путем открытия файлов с расширениями «.ms12», «.mp12».

1. Измерение сток-затворной характеристики транзистора.

- 1.1. Откройте файл проекта **Исследование автогенератора. mp12** из папки **Исследование автогенератора**, дважды щелкнув по нему левой клавишей мыши. В окне разработки **Design Toolbox**, расположенном слева, на вкладке **Project View**, раскройте данный проект, щелкнув мышью по символу «+», затем раскройте категорию **Schematic** и в ней дважды щелкните левой клавишей мыши по файлу **ВХ полевого транзистора. ms12**, при этом в окне редактора схем должна открыться схема для измерения сток-затворной характеристики, показанная на рис. 6.5.

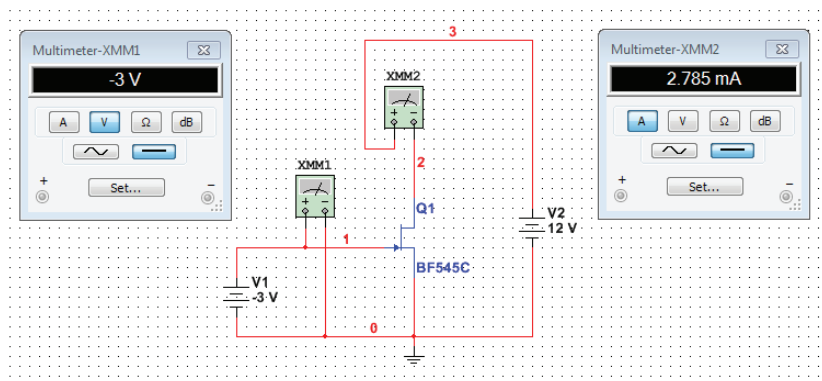






Рис. 6.5. Схема для измерения сток-затворной характеристики

Если интерактивные панели мультиметров скрыты, то дважды щелкните левой клавишей мыши по изображению измерительного прибора на схеме. Для перемещения интерактивной панели прибора наведите курсор на ее верхнюю часть и перемещайте его при нажатой левой клавише мыши.

1.2. Проверьте и при необходимости установите режимы работы мультиметров: XMM1 — постоянное напряжение — нажатые кнопки **V** и **—** на интерактивной панели, XMM2 — постоянный ток — нажатые кнопки **A** и **—**. Проверьте и при необходимости установите напряжение источника V1 в диапазоне от -3 В до -2 В, для этого дважды щелкните левой клавишей мыши по изображению источника, и в открывшемся окне «DC_POWER» на вкладке **Value** в поле «Voltage (V)» введите с клавиатуры требуемое значение напряжения, и затем нажмите **ОК**. Проверьте и при необходимости установите напряжение источника V2 равное 12 В. Запустите симуляцию нажатием кнопки «Run»  на панели инструментов. Убедитесь, что мультиметр XMM1 показывает напряжение между затвором и истоком транзистора, равное напряжению источника V1, а мультиметр XMM2 показывает ток, протекающий в цепи сто-

ка, равный нескольким единицам миллиампер. Остановите симуляцию нажатием кнопки «Stop»  на панели инструментов.





1.3. Устанавливая напряжение источника V1 от -6 В до -1 В, как описано выше в п. 1.2, с шагом $0,5$ В, запуская и останавливая каждый раз симуляцию кнопками «Run»  и «Stop» , снимите зависимость тока стока от напряжения между затвором и истоком, результаты занесите в таблицу:

$U_{зи}, \text{В}$	-6	$-5,5$	-5	...	-1
$i_c, \text{мА}$					

Постройте график зависимости $i_c(U_{зи})$, сравните его с заданным в исходных данных (см. прил. 4).

1.4. По результатам измерений в п. 1.3 выберите на сток-затворной характеристике два значения напряжения смещения: $U_{см1}^{\text{мод}}$, соответствующее току стока $i_c \approx 3 \text{ мА}$, и $U_{см2}^{\text{мод}}$, соответствующее началу характеристики (крайняя правая точка на оси $U_{зи}$, в которой $i_c = 0$).

2. Исследование резонансного усилителя.

2.1. Остановите симуляцию в файле **ВАН полевого транзистора** кнопкой «Stop» . Откройте файл **Резонансный усилитель. ms12**, дважды щелкнув по нему левой клавишей мыши в окне разработки **Design Toolbox** в категории **Schematic**. При этом в окне редактора схем должна появиться схема, показанная на рис. 6.6. Если интерактивные панели приборов не отображаются, то откройте их, дважды щелкнув левой клавишей мыши по изображению измерительного прибора на схеме, и разместите их на экране удобным образом. Установите режимы работы на интерактивных панелях приборов: мультиметры ХММ1 и ХММ2 — переменное напряжение — нажатые кнопки  и , функциональный генератор XFG1 — гармоническое напряжение — нажатая кнопка . На интерактивной панели осциллографа XSC1 установите следующие режимы:

Timebase: Scale — «10 us/Div» (щелкните левой клавишей мыши по полю ввода-вывода и затем установите требуемое значение кнопками инкремента–декремента), X position — «0», **Y/T**;
 Channel A: Scale — «50 mV/Div», Y position — «0», **AC**;
 Channel B: Scale — «1 V/Div», Y position — «0», **AC**;
 Trigger: Edge — **↕**, **A**; Level — «0» «V»; **Auto**.

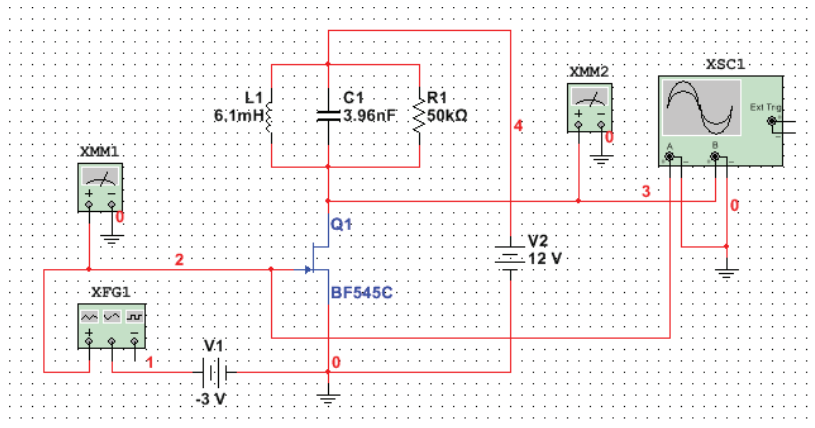


Рис. 6.6. Схема для исследования резонансного усилителя

2.2. Установите параметры элементов колебательного контура следующим образом. $L1$ — значение L из исходных данных (см. прил. 4), для этого дважды щелкните левой клавишей мыши по изображению индуктивности и в открывшемся окне «Inductor» на вкладке **Value** в поле «Inductance (L)» введите требуемое значение индуктивности (значение можно ввести с клавиатуры или выбрать из выпадающего списка), затем нажмите **ОК**. Значения емкости и сопротивления рассчитайте по формулам:


$$C1 = \frac{1}{(2\pi f_p)^2 L1}, \quad (6.8)$$

$$Rl = \sqrt{\frac{Ll}{Cl}} \quad Q = 2\pi f_p LlQ, \quad (6.9)$$

где f_p и Q — резонансная частота и добротность, заданные в исходных данных (см. прил. 4). Введите рассчитанные значения в поля «Capacitance (C)» и «Resistance (R)» на вкладках **Value** в соответствующих окнах свойств элементов аналогично установке индуктивности.

2.3. Установите значение напряжения источника V1 равное U_{cm1}^{mod} , для этого дважды щелкните левой клавишей мыши по изображению источника и введите требуемое значение в поле «Voltage (V)» на вкладке **Value** в окне свойств, затем нажмите **ОК**. Проверьте и при необходимости установите напряжение источника V2 равное 12 В.


На интерактивной панели функционального генератора XFG1 в поле «Frequency» введите заданное значение частоты f_p (см. прил. 4), а в поле «Amplitude» — значение «50» «mVp» (50 мВ).



Запустите симуляцию кнопкой «Run» , убедитесь с помощью осциллографа, что на входе усилителя (Channel A) присутствует гармонический сигнал с заданными на генераторе параметрами (период—частота, амплитуда), а на выходе (Channel B) — гармонический сигнал той же частоты с амплитудой $U_{lm} \leq V2/2$, где V2 — ЭДС стокового питания, $V2 = 12$ В. При необходимости измените масштабы и длительность развертки осциллографа. Измерьте действующие значения напряжений на входе $U_{вх}$ и на выходе $U_{вых}$ с помощью мультиметров ХММ1 и ХММ2, рассчитайте коэффициент усиления $K_1 = U_{вых}/U_{вх}$, он должен составлять несколько десятков ($K_1 = 20...50$).

Проверьте настройку контура в резонанс, для этого, не останавливая симуляцию, изменяйте частоту в поле «Frequency» функционального генератора на +100 Гц, +200 Гц и т. д., затем на –100 Гц, –200 Гц и т. д. и убедитесь, что установленному значению соответствует максимум выходного напряжения.

2.4. Снимите колебательную характеристику усилителя для $U_{\text{см1}}^{\text{мод}}$. Для этого убедитесь, что напряжение источника V1 равно $U_{\text{см1}}^{\text{мод}}$, затем, не останавливая симуляцию, вводите в поле «Amplitude» на интерактивной панели генератора XFG1 значения от 0 до 500–600 мВ с шагом 50 мВ и каждый раз измеряйте действующие значения входного $U_{\text{вх}}$ и выходного $U_{\text{вых}}$ напряжений с помощью мультиметров ХММ1 и ХММ2. Результаты занесите в таблицу:


$U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$	0	...				
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$						
$U_m, \text{ мВ}$						
$U_{1m}, \text{ В}$						
K_1						
$1/K_1$						

Остановите симуляцию кнопкой «Stop» . По результатам измерений рассчитайте амплитуды входного и выходного напряжений $U_m = \sqrt{2}U_{\text{вх}}$, $U_{1m} = \sqrt{2}U_{\text{вых}}$, коэффициент усиления $K_1 = U_{1m}/U_m$, величину, обратную коэффициенту усиления $1/K_1$. Результаты занесите в таблицу. Постройте график колебательной характеристики $U_{1m}(U_m)$. Сравните полученный график с рис. 6.3 — в данном случае коэффициент усиления K_1 должен монотонно уменьшаться с ростом U_m .

2.5. Снимите колебательную характеристику усилителя для $U_{\text{см2}}^{\text{мод}}$. Для этого установите значение напряжения источника V1 равное $U_{\text{см2}}^{\text{мод}}$ (при остановленной симуляции). Запустите симуляцию кнопкой «Run»  и выполните измерения аналогично п. 2.4, вводя в поле «Amplitude» на интерактивной панели генератора XFG1 значения от 0 до 1400–1600 мВ с шагом 100–150 мВ. Остановите симуляцию кнопкой «Stop» , выполните обработку результатов аналогично п. 2.4, полученные данные занесите в таблицу. Постройте график колебательной характеристики $U_{1m}(U_m)$. Сравните полученный график с рис. 6.4 —

в данном случае должна наблюдаться немонотонная зависимость $K_1(U_m)$.

3. Исследование автогенератора в мягком режиме.

3.1. Убедитесь, что симуляция остановлена, иначе остановите симуляцию кнопкой «Stop» . Откройте файл **Автогенератор мягкий режим.ms12**, дважды щелкнув по нему левой клавишей мыши в окне **Design Toolbox**, при этом в окне редактора схем должна открыться схема, показанная на рис. 6.7.

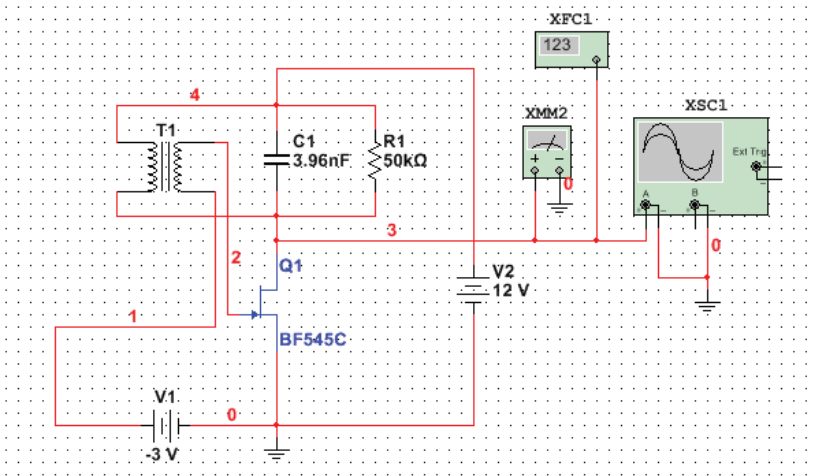






Рис. 6.7. Схема для исследования автогенератора в мягком режиме

Если интерактивные панели приборов не отображаются, откройте их, дважды щелкнув левой клавишей мыши по изображению измерительного прибора на схеме, и разместите их на экране удобным образом. Выберите следующие режимы работы. Мультиметр XMM2 — переменное напряжение — нажатые кнопки  и . Частотометр XFC1 — «Measurement» — , «Coupling» — , «Sensitivity (RMS)» — «3» «V», «Trigger level» — «0» «V». На интерактивной панели осциллографа XSC1 установите следующие режимы:

Timebase: Scale — «50 us/Div», X position — «0», Y/T ;

Channel A: Scale — «5 V/Div», Y position — «0», AC ;

Channel B: произвольные значения, т. к. канал не используется;

Trigger: Edge — \uparrow , A; Level — «0» «V»; Auto.

3.2. Установите параметры элементов колебательного контура такие же, какие использовались при исследовании резонансного усилителя в п. 2.2. Для этого дважды щелкните левой клавишей мыши по изображению трансформатора T1 и в открывшемся окне «TS_IDEAL» на вкладке **Value** установите индуктивность первичной обмотки «Primary coil inductance» равную индуктивности L_1 , затем нажмите **OK**. Установите значения емкости C_1 и сопротивления R_1 , рассчитанные по формулам (6.8), (6.9) в п. 2.2, дважды щелкнув по изображению элемента и введя значения в соответствующие поля на вкладках **Value** в окне свойств.

3.3. Установите напряжение источника V1 равное $U_{\text{см1}}^{\text{мод}}$, проверьте и при необходимости установите напряжение источника V2 равное 12 В. В таблице колебательной характеристики, снятой для $U_{\text{см1}}^{\text{мод}}$, см. п. 2.4, отметьте два значения — минимальное $(1/K_1)_{\text{мин}}$ и максимальное $(1/K_1)_{\text{макс}}$, выберите 2 точки между этими значениями с равномерным шагом $\Delta = [(1/K_1)_{\text{макс}} - (1/K_1)_{\text{мин}}]/3$, т. е. $(1/K_1) = (1/K_1)_{\text{мин}} + \Delta$ и $(1/K_1) = (1/K_1)_{\text{мин}} + 2\Delta$, а также одну точку $(1/K_1) < (1/K_1)_{\text{мин}}$ с таким же шагом, т. е. $(1/K_1) = (1/K_1)_{\text{мин}} - \Delta$. Присвойте полученные значения коэффициенту обратной связи $K_{\text{ос}}$, результаты занесите в таблицу:



$K_{\text{ос}}$		$(1/K_1)_{\text{мин}}$			$(1/K_1)_{\text{макс}}$
L_2 , мкГн					
$U_{\text{вых}}$, В					
f , кГц					
U_{1m} , В					

На одном рисунке с графиком колебательной характеристики постройте прямые обратной связи для полученных коэффициентов K_{oc} , см. рис. 6.3, отметьте стационарные точки и определите амплитуду колебаний на выходе автогенератора в установившемся режиме для каждого значения K_{oc} (можно выполнить при оформлении отчета).

Для каждого значения K_{oc} рассчитайте соответствующую индуктивность вторичной обмотки трансформатора по формуле


$$L2 = K_{oc}^2 L1. \quad (6.10)$$

Результаты занесите в таблицу.

Снимите зависимость действующего значения $U_{вых}$ и частоты колебаний f автогенератора от коэффициента обратной связи K_{oc} . Для этого дважды щелкните левой клавишей мыши по изображению трансформатора T1 на схеме, в открывшемся окне «TS_IDEAL» на вкладке **Value** установите индуктивность вторичной обмотки «Secondary coil inductance» равную первому значению $L2$ из таблицы, коэффициент связи «Coefficient of coupling» установите равным 1, нажмите **ОК**. Запустите симуляцию кнопкой «Run» , следите по осциллографу за установлением колебаний, при установлении колебаний измерьте действующее значение $U_{вых}$ по мультиметру и частоту f по частотомеру. Результаты занесите в таблицу. Остановите симуляцию кнопкой «Stop» . Установите следующее значение индуктивности $L2$ и повторите измерения.

По результатам измерений рассчитайте амплитуду колебаний на выходе автогенератора $U_{1m} = \sqrt{2}U_{вых}$, постройте график зависимости $U_{1m}(K_{oc})$.

4. Исследование автогенератора в жестком режиме.

4.1. Убедитесь, что симуляция остановлена, иначе остановите симуляцию кнопкой «Stop» . Откройте файл **Автогенератор жесткий режим. ms12**, дважды щелкнув по нему левой клавишей мыши в окне **Design Toolbox**, при этом в окне редактора схем должна открыться схема, показанная на рис. 6.8.

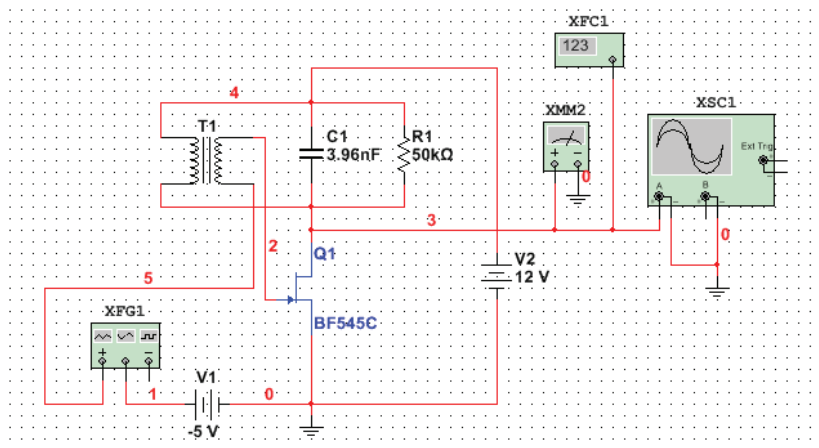



Рис. 6.8. Схема для исследования автогенератора в жестком режиме

Если интерактивные панели приборов не отображаются, откройте их, дважды щелкнув левой клавишей мыши по изображению измерительного прибора на схеме, и разместите их на экране удобным образом. Установите режимы работы мультиметра XMM2, частотомера XFC1 и осциллографа XSC1 таким же образом, как в предыдущем исследовании, см. п. 3.1. На интерактивной панели функционального генератора XFG1 выберите гармонический сигнал — кнопка , в поле «Frequency» введите заданное значение резонансной частоты f_p (которая использовалась в резонансном усилителе), а в поле «Amplitude» — значение «1» «mVp» (1 мВ).


4.2. Установите параметры колебательного контура — индуктивность первичной обмотки трансформатора T1, емкость C1 и сопротивление R1 таким же образом, как в предыдущем исследовании, см. п. 3.2.

4.3. Установите напряжение источника V1 равное $U_{\text{см2}}^{\text{мод}}$, проверьте и при необходимости установите напряжение источника V2 равное 12 В. В таблице колебательной характеристики,

снятой для $U_{\text{см2}}^{\text{мод}}$, см. п. 2.5, отметьте значение $(1 / K_1)|_{U_{\text{вых макс}}}$, соответствующее максимальному выходному напряжению или чуть меньшему (крайнее правое значение в таблице или предыдущее). Присвойте полученное значение коэффициенту обратной связи $K_{\text{ос}} \approx (1 / K_1)|_{U_{\text{вых макс}}}$.


На одном рисунке с графиком колебательной характеристики постройте прямую обратной связи для данного $K_{\text{ос}}$ (рис. 6.4), отметьте стационарные точки и определите амплитуду колебаний на выходе автогенератора в установившемся режиме (можно выполнить при оформлении отчета).

Для данного значения $K_{\text{ос}}$ рассчитайте индуктивность вторичной обмотки трансформатора L_2 по формуле (6.10), дважды щелкните левой клавишей мыши по изображению трансформатора Т1 на схеме и введите данное значение в поле «Secondary coil inductance» на вкладке **Value** в открывшемся окне свойств, коэффициент связи «Coefficient of coupling» установите равным 1, нажмите **ОК**.



4.4. Проверьте, что напряжение источника V1 равно $U_{\text{см2}}^{\text{мод}}$, а на интерактивной панели функционального генератора XFG1 установлена заданная частота f_p и амплитуда 1 мВ, форма сигнала гармоническая. Запустите симуляцию кнопкой «Run» . Не останавливая симуляцию, увеличивайте амплитуду сигнала на интерактивной панели функционального генератора XFG1 $U_{\text{Ампл ген}}$ с шагом 50 мВ, при этом каждый раз следите в течение нескольких секунд по осциллографу за установлением амплитуды колебаний на выходе автогенератора, измеряйте действующее значение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ по мультиметру и, при возникновении автоколебаний, частоту f по частотомеру. Результаты занесите в таблицу:

$U_{\text{Ампл ген}}, \text{ мВ}$	1	50	100	...			1
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$							
$f, \text{ кГц}$							
$U_{\text{лм}}, \text{ В}$							

Когда возникнут автоколебания (амплитуда выходного сигнала резко увеличится и приблизится к ЭДС стокового питания), уменьшайте амплитуду сигнала генератора $U_{\text{Ampl ген}}$ с шагом 50 мВ до 1 мВ, при этом проводите измерения $U_{\text{вых}}$ и f , результаты заносите в таблицу.

Остановите симуляцию кнопкой «Stop» . Рассчитайте амплитуду колебаний на выходе автогенератора $U_{lm} = \sqrt{2}U_{\text{вых}}$, результаты занесите в таблицу. Постройте график зависимости $U_{lm}(U_{\text{Ampl ген}})$, отметьте на нем направление изменения $U_{\text{Ampl ген}}$.

5. Завершение исследований и выход из программы.

Убедитесь, что симуляция остановлена, иначе остановите ее кнопкой «Stop» . Закройте проект, щелкнув левой клавишей мыши по кнопке  в верхнем правом углу, если при этом возникнет окно с сообщением «The file «...» has been modified. Do you want to save it», нажмите **No**. Если возникнет окно с сообщением «You have made changes to the project workspace. Do you want to save your changes?», нажмите **No**.

6.4. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) принципиальную схему LC-автогенератора на полевом транзисторе с трансформаторной обратной связью;
- 3) исходные данные к работе, а также параметры колебательного контура, рассчитанные в ходе эксперимента;
- 4) результаты экспериментальных исследований —
 - таблицу и график сток-затворной характеристики с отмеченными на них значениями $U_{\text{см1}}^{\text{мод}}$ и $U_{\text{см2}}^{\text{мод}}$;
 - результаты исследования резонансного усилителя: таблицы с экспериментальными и рассчитанными данными, графики колебательных характеристик $U_{lm}(U_m)$ для $U_{\text{см1}}^{\text{мод}}$ и $U_{\text{см2}}^{\text{мод}}$;

- результаты исследования автогенератора в мягком режиме: таблицу с данными, прямые обратной связи для различных K_{oc} на одном рисунке с графиком колебательной характеристики, отмеченные на графике стационарные точки, экспериментальный график $U_{1m}(K_{oc})$;
 - результаты исследования автогенератора в жестком режиме: значение коэффициента K_{oc} , индуктивность вторичной обмотки L_2 , прямую обратной связи на одном рисунке с графиком колебательной характеристики, стационарные точки, таблицу с данными, график $U_{1m}(U_{Ampl\text{ ген}})$;
- 5) выводы по каждому пункту экспериментального задания.

Контрольные вопросы

1. Изобразите структурную схему цепи с обратной связью, поясните назначение элементов. Как рассчитать коэффициент передачи цепи с обратной связью?
2. Какие бывают виды обратной связи, где они используются?
3. Сформулируйте определение автогенератора.
4. Изобразите принципиальную схему автогенератора с трансформаторной обратной связью, поясните назначение элементов.
5. Какие условия необходимо выполнить, чтобы в автогенераторе возникли колебания, чему равна частота колебаний?
6. Что такое стационарный режим работы автогенератора, какое условие стационарного режима?
7. Как с использованием графика колебательной характеристики определить амплитуду колебаний в стационарном режиме?

8. Что такое устойчивая и неустойчивая стационарные точки?
9. Объясните процесс возникновения и установления колебаний в автогенераторе с мягким режимом самовозбуждения.
10. Объясните процесс возникновения и установления колебаний в автогенераторе с жестким режимом самовозбуждения.
11. Как необходимо выбирать напряженность режима усиительного элемента в автогенераторах?
12. Что такое условие баланса амплитуд и условие баланса фаз?

Использованный библиографический список

- 1 Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы : учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Радиотехника» / С. И. Баскаков. 5-е изд., стер. М. : Высш. шк., 2005. 462 с.
- 2 Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подг. «Радиотехника» / И. С. Гоноровский. 5-е изд., испр. М. : Дрофа, 2006. 720 с.
- 3 Андреев В. С. Теория нелинейных электрических цепей : учеб. пособие для электротехн. ин-тов связи / В. С. Андреев. М. : Радио и связь, 1982. 281 с.
- 4 Комплект виртуальных измерительных приборов для учебных лабораторий NI ELVIS. Технические средства [Электронный ресурс] : руководство пользователя. Режим доступа: <http://www.ni.com>.
- 5 LabVIEW [Электронный ресурс] : руководство пользователя. Режим доступа: <http://www.ni.com>.
- 6 Введение в Multisim: трехчасовой курс [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ni.com>.

Приложение 1 (обязательное)

Данные к лабораторной работе № 1

Номер стенда	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Для всех сигналов										
U_m , В	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Для импульсных сигналов										
T , мс	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Прямоугольные импульсы										
$\tau_{и1}$, мс	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\omega_{ср}$	$0,8\omega_B$	$0,7\omega_B$	$0,6\omega_B$	$0,5\omega_B$	$0,4\omega_B$	$0,3\omega_B$	$0,8\omega_B$	$0,7\omega_B$	$0,6\omega_B$	$0,5\omega_B$
Треугольные импульсы										
$\tau_{и2}$, мс	0,5	0,75	1	1,25	1,5	0,5	0,75	1	1,25	1,5
t_3 , мс	0,1	0,25	0,15	0,2	0,25	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
Пилообразные импульсы										
$s(t)$	$s_1(t)$	$s_2(t)$	$s_1(t)$	$s_2(t)$	$s_1(t)$	$s_2(t)$	$s_1(t)$	$s_2(t)$	$s_1(t)$	$s_2(t)$
АМ-сигнал										
M , %	20	30	40	50	60	70	20	30	40	50

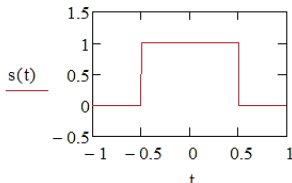
Приложение 2 (рекомендуемое)

Пример выполнения расчетов к лабораторной работе № 1 в программе Mathcad

Коэффициенты тригонометрического ряда Фурье прямоугольных импульсов:

$U_m := 1.0$ $T := 2$ $\tau_i := 1$ //исходные данные

$s(t) := \begin{cases} U_m & \text{if } \frac{-\tau_i}{2} \leq t \leq \frac{\tau_i}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ //аналитическое описание сигнала
//на периоде



//построение графика для проверки
//на отрезке $[-T/2; T/2]$

$a_0 := \frac{4}{T} \cdot \left(\int_0^{\frac{T}{2}} s(t) dt \right) = 1$ $\frac{a_0}{2} = 0.5$ //расчет постоянной
//составляющей, используется
//свойство четности сигнала

ORIGIN := 1 //определение начала индексации массива
 $n := 1..8$ //номер гармоники, для которой выполняется расчет,
//индекс массива

$a_n := \frac{4}{T} \cdot \left(\int_0^{\frac{T}{2}} s(t) \cdot \cos\left(n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t\right) dt \right)$ //коэффициенты, используется
//свойство четности сигнала
 $b_n := 0$

$A_n := \sqrt{(a_n)^2 + (b_n)^2}$ //амплитуды гармоник

$Adb_n := 20 \cdot \log\left(\frac{U_m}{A_n + 10^{-12}}\right)$ //ослабление гармоник относительно U_m ,
// 10^{-12} добавлено, чтобы избежать деления
//на ноль

$\varphi_n := \begin{cases} 0 & \text{if } a_n \geq 0 \\ 180 & \text{if } a_n < 0 \end{cases}$ //начальные фазы гармоник,
//т.к. $b_n=0$, то $\varphi_n=0$, если $a_n \geq 0$
//и $\varphi_n=180$ град, если $a_n < 0$

$$n = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{pmatrix} \quad a = \begin{pmatrix} 0.637 \\ 0 \\ -0.212 \\ 0 \\ 0.127 \\ 0 \\ -0.091 \\ 0 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} 0.637 \\ 0 \\ 0.212 \\ 0 \\ 0.127 \\ 0 \\ 0.091 \\ 0 \end{pmatrix} \quad Adb = \begin{pmatrix} 3.922 \\ 240 \\ 13.465 \\ 240 \\ 17.902 \\ 240 \\ 20.824 \\ 240 \end{pmatrix} \quad \varphi = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 180 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 180 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Амплитуды и начальные фазы гармоник на выходе RC-цепи:

$$k\omega := 0.8 \quad // \text{коэффициент, определяющий соотношение } \omega_{cp} \text{ и } \omega_b$$

$$\omega_b := \frac{2 \cdot \pi}{T_1} = 6.283 \quad // \text{верхняя частота спектра } \omega_b$$

$$\omega_s := k\omega \cdot \omega_b = 5.027 \quad // \text{частота среза RC-цепи } \omega_{cp}$$

$$\omega_1 := \frac{2 \cdot \pi}{T} = 3.142 \quad // \text{частота первой гармоники}$$

$$\omega_n := n \cdot \omega_1 \quad // \text{частоты гармоник}$$

$$K_n := \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_n}{\omega_s}\right)^2}} \quad \psi_n := \left(-\operatorname{atan}\left(\frac{\omega_n}{\omega_s}\right)\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad // \text{АЧХ и ФЧХ RC-цепи}$$

$$A_{out_n} := A_n \cdot K_n \quad \theta_{out_n} := -\varphi_n + \psi_n \quad // \text{амплитуды и начальные фазы} \\ // (\text{с учетом "-" гармоник}) \\ // \text{на выходе цепи}$$

$$A_{outdb_n} := 20 \cdot \log\left(\frac{U_m}{A_{out_n} + 10^{-12}}\right) \quad // \text{ослабление гармоник на выходе цепи}$$

$$K = \begin{pmatrix} 0.848 \\ 0.625 \\ 0.471 \\ 0.371 \\ 0.305 \\ 0.258 \\ 0.223 \\ 0.196 \end{pmatrix} \quad \psi = \begin{pmatrix} -32 \\ -51 \\ -62 \\ -68 \\ -72 \\ -75 \\ -77 \\ -79 \end{pmatrix} \quad A_{out} = \begin{pmatrix} 0.54 \\ 0 \\ 0.1 \\ 0 \\ 0.039 \\ 0 \\ 0.02 \\ 0 \end{pmatrix} \quad A_{outdb} = \begin{pmatrix} 5.35 \\ 240 \\ 20.01 \\ 240 \\ 28.22 \\ 240 \\ 33.87 \\ 240 \end{pmatrix} \quad \theta_{out} = \begin{pmatrix} -32 \\ -51 \\ -242 \\ -68 \\ -72 \\ -75 \\ -257 \\ -79 \end{pmatrix}$$

Приложение 3 (обязательное)

Основные элементы ИПУ виртуальных приборов

Поле вывода. В поле вывода, как правило, на черном, сером или другом фоне отображается числовое значение измеренного параметра, а также текстовая информация об единицах измерения, режимах работы и т. п. В полях вывода могут отображаться графики и диаграммы.



Индикаторы. Имитируют лампочки и светодиоды. Имеют вид цветного круга или прямоугольника, выключенное состояние отображается темных цветом, включенное — светлым.



Кнопки. Предназначены для включения или переключения определенных функций и режимов работы. Нажатие кнопки производится щелчком по ней левой клавишей мыши.

Display



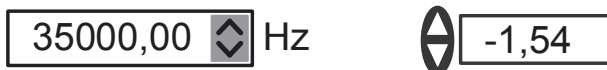
Run



AutoScale

Поле ввода-вывода. В поле ввода-вывода, как правило, на белом фоне отображается числовое значение установленного параметра. Данные в это поле могут быть введены непосредственно с клавиатуры ПК. Для этого необходимо щелкнуть левой

клавишей мыши по соответствующему полю, ввести необходимые данные и нажать клавишу <Enter>. Если справа или слева от поля расположены кнопки инкремента—декремента, то, щелкая по ним левой клавишей мыши, можно изменять параметр с определенной дискретностью.

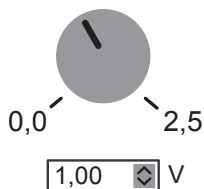


Выпадающий список. Вид этого списка аналогичен полю ввода-вывода. Предназначен для выбора значения параметра из списка. Для установки требуемого значения необходимо щелкнуть левой клавишей мыши по кнопке ▼ в правой части поля или по кнопке ▼ рядом, затем щелкнуть левой клавишей мыши по строке с требуемым значением из раскрывшегося списка.

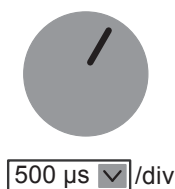


Регулятор. Имитирует ручки управления, переключатели. Предназначен для плавного или дискретного изменения параметра. Для вращения или перемещения регулятора необходимо установить указатель мыши на риску или ползунок, нажать левую клавишу мыши и перемещать регулятор в требуемое положение при нажатой левой клавише мыши. Часто под регулятором или рядом отображается числовой дисплей, имеющий вид поля ввода-вывода или выпадающего списка, в этом случае установка параметра может осуществляться как с помощью регулятора, так и с помощью числового дисплея.

Peak Amplitude




TIMEBASE



Масштаб по оси X



Кнопка . Нажатие данной кнопки открывает окно контекстной справки. В этом окне отображается справочная информация по элементу ИПУ, на который установлен указатель мыши.

Приложение 4

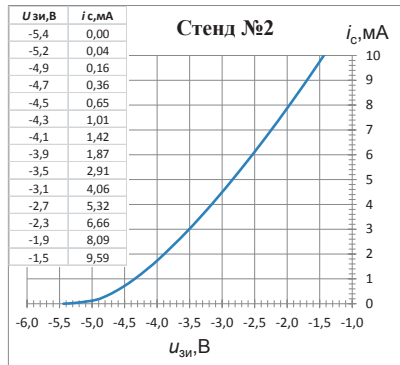
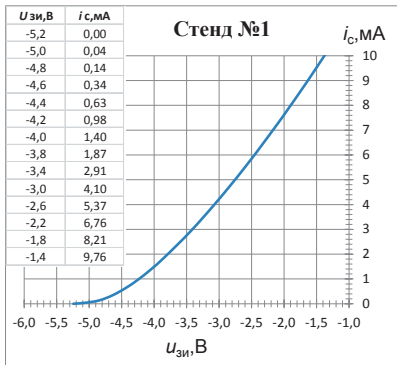
(обязательное)

Данные к лабораторным работам № 2–6

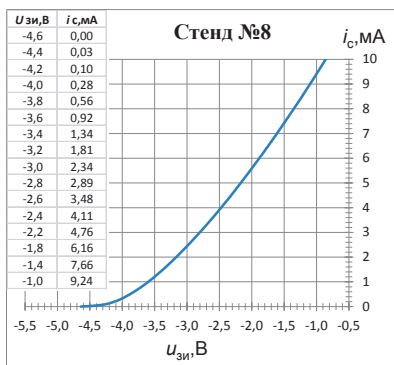
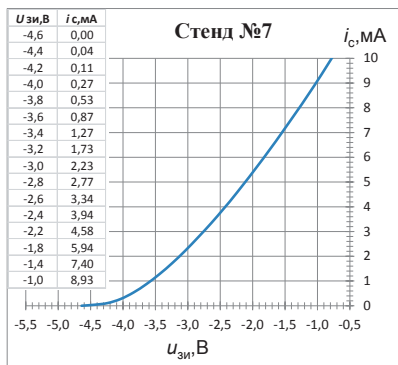
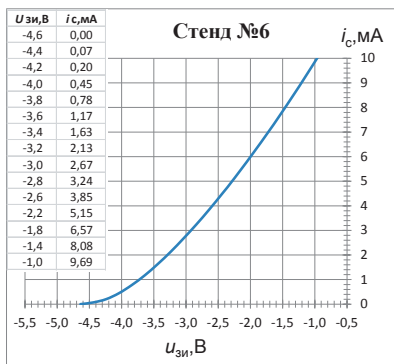
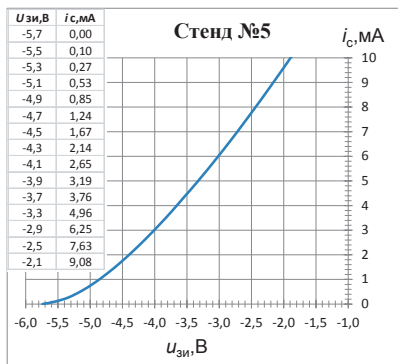
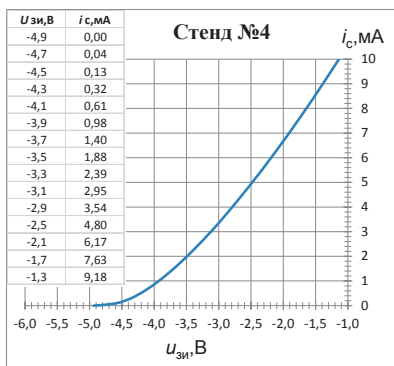
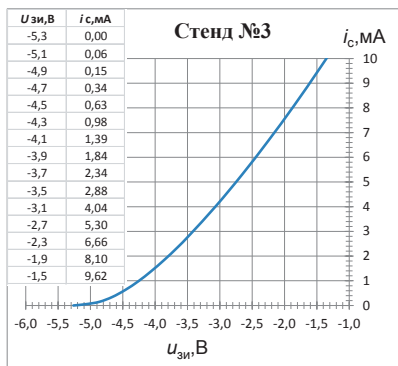
Параметры колебательных контуров

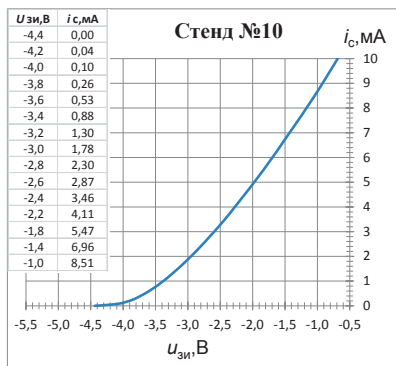
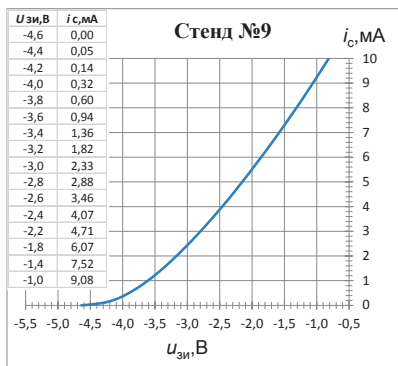
Данные	Номер стенда									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_p , кГц	29,4	31,3	31,7	35,1	29,9	31,1	32,1	35,3	35,0	29,7
L , мГн	6,1	6,6	5,7	4,2	5,7	6,6	5,7	3,3	5,7	7,4
p	0,36	0,41	0,32	0,36	0,32	0,41	0,32	0,45	0,32	0,36
Q	43	43	47	44	42	38	44	48	48	40

Характеристики транзисторов



Приложение 4. Данные к лабораторным работам № 2-6





Приложение 5

(рекомендуемое)

Пример выполнения расчетов к лабораторной работе № 2 в программе Mathcad

$$f_r := 50 \cdot 10^3 \quad L_m := 5.5 \cdot 10^{-3} \quad p := 0.25 \quad Q := 50 \quad // \text{Исходные данные}$$

$$\rho := 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot L = 1.728 \times 10^3 \quad // \text{Расчет параметров контура}$$

$$R_{oe} := p^2 \cdot \rho \cdot Q = 5.4 \times 10^3$$

$$\tau k := \frac{Q}{\pi \cdot f_r} = 3.183 \times 10^{-4}$$

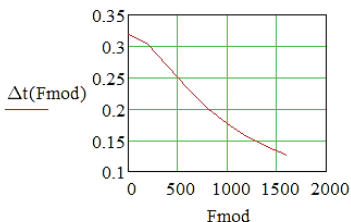
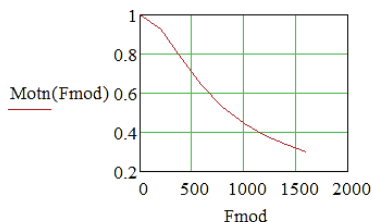
$$F_{mod} := 1, 1 + 200 .. 1700 \quad // \text{Частота модуляции,} \\ // F_{мин}=1\text{Гц, } \Delta F=200\text{Гц, } F_{макс}=1700\text{Гц}$$

$$Motn(F_{mod}) := \frac{1}{\sqrt{1 + \tau k^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot F_{mod})^2}} \quad // \text{Расчет } M_{вых}/M$$

$$\Delta\psi(F_{mod}) := \text{atan}(\tau k \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_{mod}) \quad // \text{Расчет } \Delta\psi$$

$$\Delta t(F_{mod}) := \frac{\Delta\psi(F_{mod})}{2 \cdot \pi \cdot F_{mod}} \cdot 10^3 \quad // \text{Расчет } \Delta t \text{ в миллисекундах}$$

Fmod =	Motn(Fmod) =	$\Delta\psi(Fmod) =$	$\Delta t(Fmod) =$
1	1	$2 \cdot 10^{-3}$	0.318
201	0.928	0.382	0.303
401	0.78	0.676	0.268
601	0.64	0.877	0.232
801	0.53	1.013	0.201
1001	0.447	1.108	0.176
1201	0.384	1.176	0.156
1401	0.336	1.228	0.14
1601	0.298	1.268	0.126



Приложение 6

(обязательное)

Описание лабораторной станции NI ELVIS

Состав лабораторной станции

Технология виртуальных измерений, применяемая в лабораторной станции NI ELVIS (National Instruments Educational Laboratory Instrumentation Suite), строится по структурной схеме, показанной на рис. П. 6.1, и объединяет в себе программные и аппаратные средства.

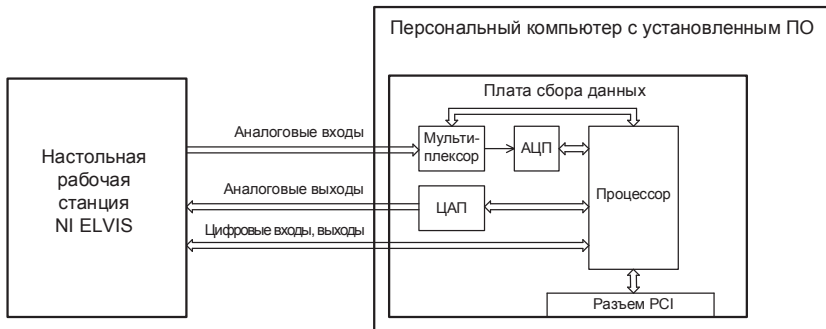


Рис. П. 6.1. Структурная схема лабораторной станции NI ELVIS

В состав лабораторной станции входят:

- настольная рабочая станция с макетной платой;
- персональный компьютер (ПК) с установленным программным обеспечением (ПО);
- плата сбора данных, установленная в слот PCI ПК.

Настольная рабочая станция

Настольная рабочая станция обеспечивает подключение исследуемых устройств к плате сбора данных. В состав станции входят:

- устройства защиты и согласования сигналов;
- источники питания;
- функциональный генератор.

На передней панели рабочей станции (рис. П. 6.2) расположены:

- **SYSTEM POWER** — индикатор системного питания;
- **PROTOTYPING BOARD POWER** — выключатель питания макетной платы с соответствующим индикатором;
- **COMMUNICATIONS** — переключатель типа связи рабочей станции с ПК;
- **VARIABLE POWER SUPPLIES** — элементы управления регулируемые источниками питания;
- **FUNCTION GENERATOR** — элементы управления функциональным генератором;
- **DMM** — входные разъемы цифрового мультиметра;
- **SCOPE** — входные гнезда осциллографа.

На задней панели рабочей станции (рис. П. 6.3) расположены:

- выключатель системного питания;
- разъем для подключения источника питания;
- разъем для подключения кабеля связи с ПК.

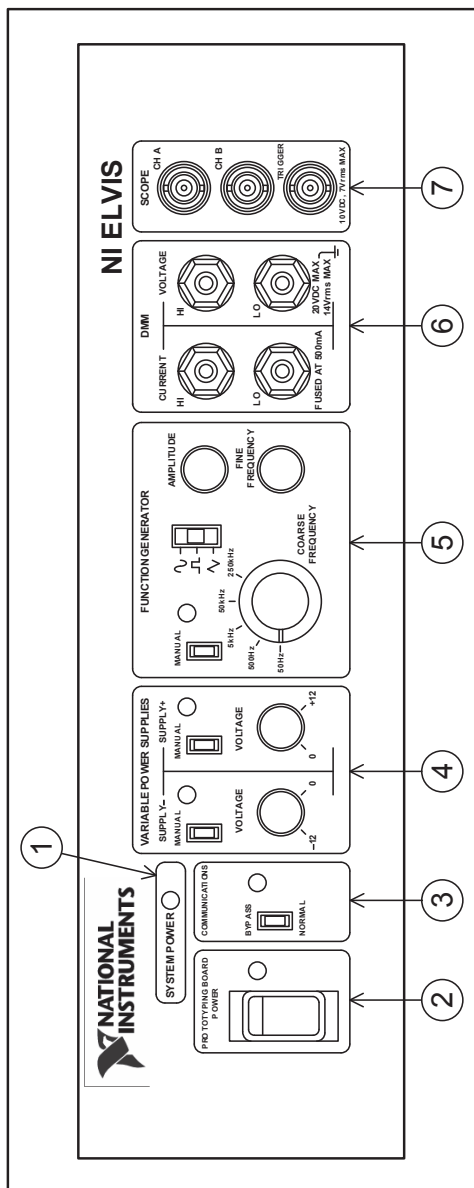


Рис. П. 6.2. Передняя панель настольной рабочей станции NI ELVIS

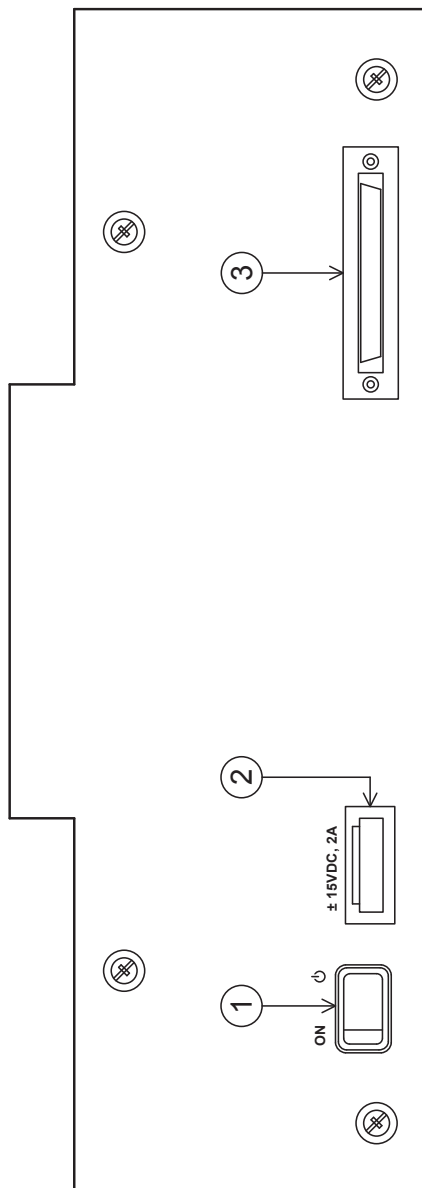


Рис. П. 6.3. Задняя панель настольной рабочей станции NI ELVIS

Макетная плата

Макетная плата NI PROTOTYPING BOARD, устанавливаемая сверху настольной рабочей станции NI ELVIS, предназначена для макетирования исследуемых устройств. На макетной плате (рис. П. 6.4) расположены:

- 1) группа пользовательских разъемов. Пользовательские разъемы соединены только с соответствующими выводами макетной платы, и разработчик может использовать их по своему усмотрению;
- 2) индикаторы включения питания макетной платы;
- 3) гнезда аналоговых входов, осциллографа и линий ввода-вывода с программируемыми функциями:
 - АСН0—АСН5 — дифференциальные аналоговые входы, непосредственно подключенные к плате сбора данных;
 - СНА, СНВ — входы каналов А и В осциллографа соответственно, дублируют одноименные гнезда на передней панели рабочей станции;
 - TRIGGER — вход внешней синхронизации осциллографа, дублирует одноименное гнездо на передней панели рабочей станции;
- 4) гнезда мультиметра, аналоговых выходов, функционального генератора, пользовательских разъемов, источников питания:
 - CURRENT HI, CURRENT LO — положительный и отрицательный токовые входы мультиметра, дублируют одноименные гнезда на передней панели;
 - VOLTAGE HI, VOLTAGE LO — положительный и отрицательный входы мультиметра для измерения напряжения, дублируют одноименные гнезда на передней панели;
 - FUNC_OUT — выход функционального генератора;
 - SYNC_OUT — выход синхронизации функционального генератора;

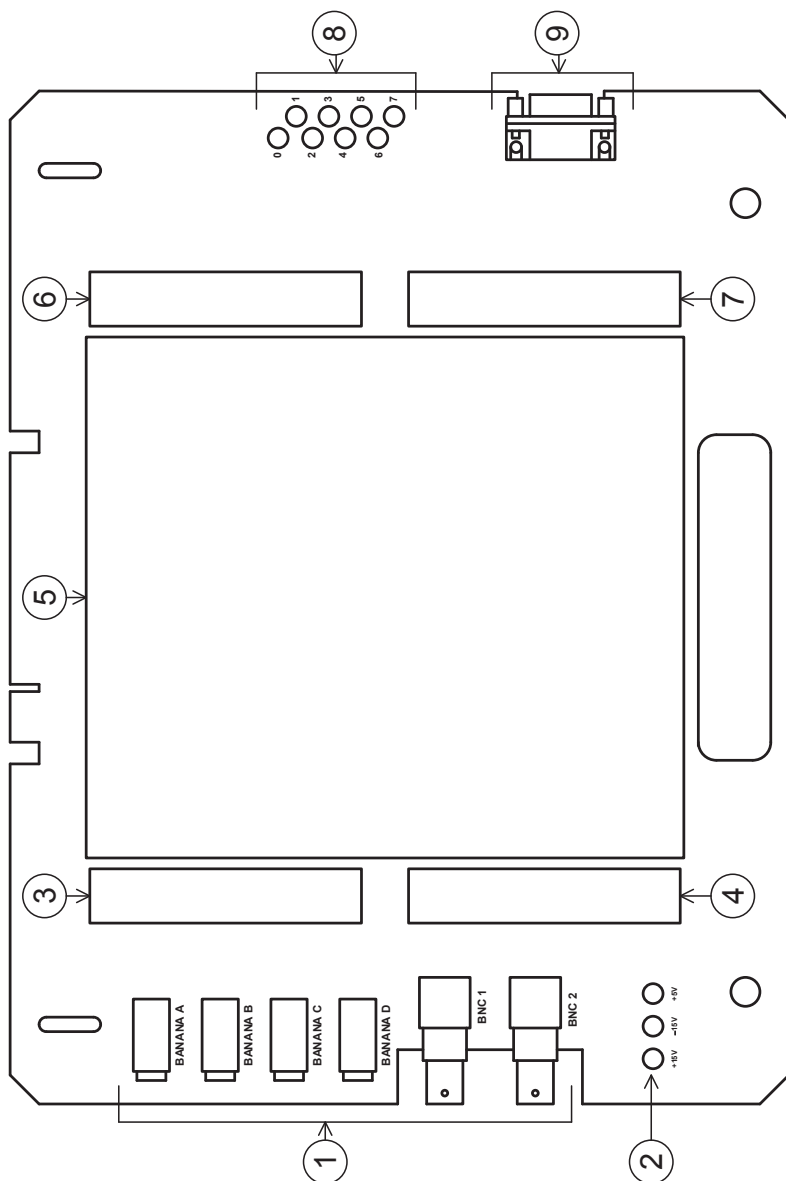


Рис. П. 6.4. Макетная плата NI PROTOTYPING BOARD

- **AM_IN** — вход амплитудной модуляции функционального генератора;
 - **SUPPLY+** — выход регулируемого источника положительного напряжения 0...+12 В;
 - **SUPPLY-** — выход регулируемого источника отрицательного напряжения –12...0 В;
 - **+15V, –15V, +5V** — выходы источника питания с соответствующим напряжением;
 - **GROUND** — общая цепь макетной платы «заземление»;
- 5) наборное поле, на котором производится сборка исследуемой цепи;
 - 6) гнезда цифровых входов, выходов;
 - 7) входы, выходы таймеров-счетчиков, гнезда пользовательских светодиодов, пользовательского разъема DSUB, источника питания +5 В;
 - 8) пользовательские светодиоды;
 - 9) пользовательский разъем DSUB.

Плата сбора данных

Плата сбора данных устанавливается в слот PCI материнской платы ПК. Основные функциональные узлы платы сбора данных показаны на рис. П. 6.1.

Аналоговые входы. На аналоговые входы могут подаваться аналоговые сигналы в виде напряжения с реальных физических устройств: генераторов, усилителей, измерительных датчиков и т. п., — установленных на макетной плате. Эти сигналы через мультиплексор поступают на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), который переводит сигналы в цифровую форму, что позволяет в дальнейшем обрабатывать, и исследовать их методами цифровой обработки сигналов, и отображать в виде графиков на экране монитора ПК. Мультиплексор позволяет поочередно подавать на вход АЦП сигналы с различ-

ных аналоговых входов, реализуя, таким образом, многоканальный сбор данных.

Аналоговые выходы. На аналоговых выходах формируются непрерывные аналоговые сигналы в виде напряжения, которые преобразуются из цифровой формы в аналоговую с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП). Таким образом, имеется возможность сформировать необходимый аналоговый сигнал с помощью программных средств цифровыми методами.

Цифровые входы, выходы. Эти входы, выходы позволяют реальным внешним устройствам обмениваться с платой данными непосредственно в цифровой форме. Они могут использоваться для задач сбора данных и управления внешними устройствами. С помощью них выполняется программное управление функциональным генератором и регулируемыми источниками питания настольной рабочей станции.

Процессор, установленный на плате, управляет сбором данных и осуществляет взаимодействие с ПК на аппаратном уровне.

Основные характеристики платы PCI-6251, используемой в составе комплекса:

- число аналоговых входов — 16 одиночных или 8 дифференциальных;
- частота дискретизации АЦП — 1 МГц;
- разрядность АЦП — 16 бит;
- максимальное входное напряжение — (± 10) В;
- число аналоговых выходов — 2;
- разрядность ЦАП — 16 бит;
- максимальное выходное напряжение — (± 10) В;
- максимальная частота работы ЦАП — 2,8 МГц;
- общее число цифровых каналов — 24.

Персональный компьютер с установленным ПО

На ПК устанавливается специальное ПО National Instruments, имеющее в своем составе:

- набор драйверов, с помощью которых осуществляется взаимодействие платы сбора данных с ПК;
- среду графического программирования LabVIEW, в которой разработаны виртуальные приборы, и набор дополнительных программ, позволяющих выполнять запуск виртуальных приборов и производить сбор и анализ данных;
- ПО NI ELVIS, которое осуществляет взаимодействие ПК с настольной рабочей станцией и реализует библиотеку из 12 виртуальных измерительных приборов. Каждый виртуальный измерительный прибор отображается на экране монитора ПК в виде интерактивной панели управления (ИПУ), на которую выводятся параметры измеряемых или формируемых сигналов, подаваемых соответственно на входы или выходы макетной платы, которая установлена на настольной рабочей станции.

Запуск измерительных приборов производится с помощью ярлыка **NI ELVIS** на рабочем столе либо из главного меню (**ПУСК** → **Все программы** → **National Instruments** → **NI ELVIS 3.0** → **NI ELVIS**), после чего открывается панель запуска приборов NI ELVIS. Запуск необходимого прибора осуществляется щелчком левой клавиши мыши по соответствующей строке панели запуска.

В лабораторном практикуме используются:

- Digital Multimeter — цифровой мультиметр;
- Oscilloscope — двухканальный осциллограф;
- Function Generator — функциональный генератор;
- Variable Power Supplies — регулируемые источники питания.

Приложение 7

(рекомендуемое)

Пример выполнения расчетов к лабораторной работе № 3 в программе Mathcad

Расчет резонансного сопротивления контура

$f_r := 50$ $L_k := 5.5$ $p := 0.25$ $Q := 50$ //Исходные данные, f_r [кГц], L_k [мГн]
//кГц x мГн = $10^3 \times 10^{-3} = 1$

$\rho := 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot L_k = 1.728 \times 10^3$ //в Омах

$R_{oe} := p^2 \cdot \rho \cdot Q \cdot 10^{-3} = 5.4$ //в килоОмах, за счет умножения на 10^{-3}

Полиномиальная аппроксимация

$i1 := 0$ $u1 := -4.4$ //Узлы аппроксимации
 $i2 := 0.88$ $u2 := -3.4$ //ток в миллиамперах, напряжение в вольтах
 $i3 := 3.46$ $u3 := -2.4$
 $i4 := 8.51$ $u4 := -1$

Given

$a0 + a1 \cdot u1 + a2 \cdot u1^2 + a3 \cdot u1^3 = i1$ //Решение системы уравнений,
 $a0 + a1 \cdot u2 + a2 \cdot u2^2 + a3 \cdot u2^3 = i2$ //определение коэффициентов
 $a0 + a1 \cdot u3 + a2 \cdot u3^2 + a3 \cdot u3^3 = i3$ //полинома
 $a0 + a1 \cdot u4 + a2 \cdot u4^2 + a3 \cdot u4^3 = i4$

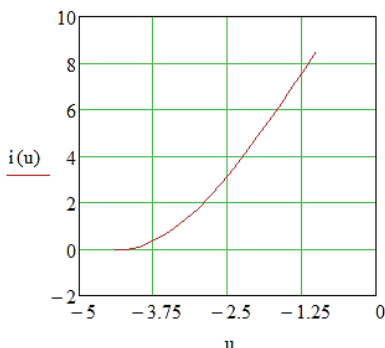
$\text{Find}(a0, a1, a2, a3) \rightarrow \begin{pmatrix} 12.131428571428571429 \\ 3.3294817927170868347 \\ -0.41607142857142857143 \\ -0.12412464985994397759 \end{pmatrix}$

$A0 := 12.131$ //mA //Присвоение коэффициентов,
 $A1 := 3.329$ //mA/V //точность не менее 3 знаков после запятой
 $A2 := -0.416$ //mA/V²
 $A3 := -0.124$ //mA/V³

Построение графика аппроксимирующей функции

$i(u) := A0 + A1 \cdot u + A2 \cdot u^2 + A3 \cdot u^3$ //аппроксимирующая функция
 $U_{min} := -4.4$ $U_{max} := -1$ //диапазон построения графика
 $du := 0.2$ //шаг изменения u
 $u := U_{min}, U_{min} + du .. U_{max}$ //определение переменной u

$u =$	$i(u) =$
-4.4	-0.008
-4.2	-0.002
-4	0.095
-3.8	0.278
-3.6	0.541
-3.4	0.877
-3.2	1.282
-3	1.748
-2.8	2.27
...	...



Расчет и построение колебательной характеристики при полиномиальной аппроксимации

$U_{sm} := -2.5$ //Напряжение смещения

$S1(U_m) := A1 + 2 \cdot A2 \cdot U_{sm} + 3 \cdot A3 \cdot U_{sm}^2 + \frac{3}{4} A3 \cdot U_m^2$ //мА/В

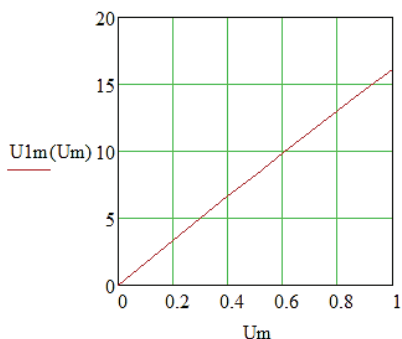
$U1m(U_m) := R_{oe} \cdot S1(U_m) \cdot U_m$

$K1(U_m) := \frac{U1m(U_m)}{U_m}$

$U_m := 0, 0 + 0.1 \dots 1$ // U_m изменяется от 0 до 1В с шагом 0,1В

$U_m =$ $S1(U_m) =$ $U1m(U_m) =$

0	3.084	0
0.1	3.083	1.665
0.2	3.08	3.326
0.3	3.076	4.982
0.4	3.069	6.629
0.5	3.061	8.263
0.6	3.051	9.883
0.7	3.038	11.484
0.8	3.024	13.065
0.9	3.009	14.621
1	2.991	16.15



$U_{mkr} := 0.6$ // U_{mkr} определена из таблиц и из графика

$K1(0.2 \cdot U_{mkr}) = 16.645$ //Коэффициенты усиления

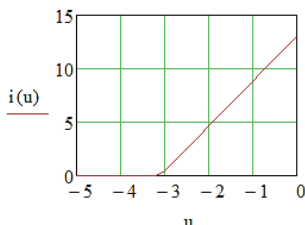
$K1(0.7 \cdot U_{mkr}) = 16.564$

Расчеты при кусочно-линейной аппроксимации
(рекомендуется выполнять отдельным файлом)

$$U_n := -3.1 \quad S_n := 4.2 \quad // \text{Параметры аппроксимации, } U_n [\text{В}], S [\text{мА/В}]$$

$$i(u) := \begin{cases} 0 & \text{if } u < U_n \\ [S \cdot (u - U_n)] & \text{if } u \geq U_n \end{cases} \quad // \text{Аппроксимирующая функция}$$

$$u := -5, -5 + 0.2 \dots 0 \quad // \text{Графическая иллюстрация}$$



Колебательная характеристика

$$R_{oe} := 5.4 \quad // \text{Взято из предыдущих расчетов, [кОм]}$$

$$cs\theta(U_m, U_{sm}) := \frac{U_m - U_{sm}}{U_m} \quad // \text{Определение функций,} \\ // \text{описывающих колебательную характеристику}$$

$$\theta(U_m, U_{sm}) := \begin{cases} 180 & \text{if } cs\theta(U_m, U_{sm}) < -1 \\ 0 & \text{if } cs\theta(U_m, U_{sm}) > 1 \\ \left(\frac{180}{\pi} \cdot \arccos(cs\theta(U_m, U_{sm})) \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\theta_{rad}(U_m, U_{sm}) := \frac{\pi}{180} \cdot \theta(U_m, U_{sm})$$

$$\gamma_1(U_m, U_{sm}) := \frac{(\theta_{rad}(U_m, U_{sm}) - \sin(\theta_{rad}(U_m, U_{sm})) \cdot \cos(\theta_{rad}(U_m, U_{sm})))}{\pi}$$

$$S_1(U_m, U_{sm}) := S \cdot \gamma_1(U_m, U_{sm})$$

$$U_{1m}(U_m, U_{sm}) := R_{oe} \cdot S_1(U_m, U_{sm}) \cdot U_m$$

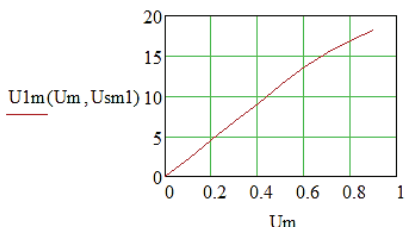
$$K_{1n}(U_m, U_{sm}) := \frac{U_{1m}(U_m, U_{sm})}{U_m}$$

$$U_{sm1} := -2.5 \quad // \text{Расчет для } U_{sm1}$$

$$U_m := 0.001, 0.001 + 0.1 \dots 1 \quad // U_m \text{ изменяется от } 0.001 \text{В, чтобы избежать} \\ // \text{деления на ноль при вычислении } \cos\theta$$

Um = csθ(Um, Usm1) θ(Um, Usm1) γ1(Um, Usm1) S1(Um, Usm1) U1m(Um, Usm1) =

1·10 ⁻³	-600	180	1	4.2	0.023
0.101	-5.941	180	1	4.2	2.291
0.201	-2.985	180	1	4.2	4.559
0.301	-1.993	180	1	4.2	6.827
0.401	-1.496	180	1	4.2	9.095
0.501	-1.198	180	1	4.2	11.363
0.601	-0.998	176.694	1	4.2	13.63
0.701	-0.856	148.862	0.968	4.065	15.388
0.801	-0.749	138.509	0.927	3.895	16.849
0.901	-0.666	131.753	0.89	3.738	18.189



Umkr := 0.45

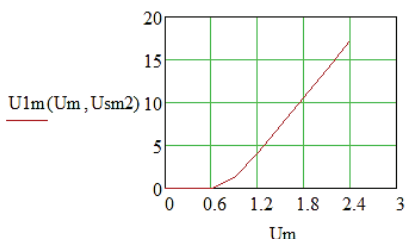
K1(0.2·Umkr, Usm1) = 22.68

K1(0.7·Umkr, Usm1) = 22.68

Usm2 := -3.8 Um := 0.001, 0.001 + 0.3 .. 2.5 //Расчет для Uсм2

Um = csθ(Um, Usm2) :θ(Um, Usm2) γ1(Um, Usm2) S1(Um, Usm2) U1m(Um, Usm2)

1·10 ⁻³	700	0	0	0	0
0.301	2.326	0	0	0	0
0.601	1.165	0	0	0	0
0.901	0.777	39.021	0.061	0.257	1.248
1.201	0.583	54.349	0.151	0.635	4.118
1.501	0.466	62.202	0.214	0.9	7.294
1.801	0.389	67.128	0.259	1.088	10.577
2.101	0.333	70.538	0.292	1.226	13.909
2.401	0.292	73.05	0.317	1.332	17.265



Umkr := 1.8

K1(0.2·Umkr, Usm2) = 0

K1(0.7·Umkr, Usm2) = 3.753

Приложение 8

(рекомендуемое)

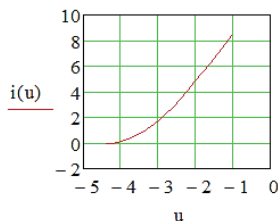
Пример выполнения расчетов к лабораторной работе № 4 в программе Mathcad

Характеристики модулятора при полиномиальной аппроксимации

$A0 := 12.131$ //Коэффициенты полинома,
 $A1 := 3.329$ //взяты из лабораторной работы № 3,
 $A2 := -0.416$ //размерность мА, мА/В, мА/В², мА/В³
 $A3 := -0.124$

$u1 := -4.4$ $u4 := -1$ //Крайние узлы аппроксимации,
//из работы № 3

$i(u) := A0 + A1 \cdot u + A2 \cdot u^2 + A3 \cdot u^3$ //Построение графика
//аппроксимирующей функции
 $u := u1, u1 + 0.2 \dots u4$ //для проверки



$Roe := 5.4$ //Roe, взято из работы № 3, в кОм

$Um := 0.21$ //Амплитуда входного несущего колебания

$S1(Usm) := A1 + 2 \cdot A2 \cdot Usm + 3 \cdot A3 \cdot Usm^2 + \frac{3}{4} A3 \cdot Um^2$ //Описание функции СМХ

$U1m(Usm) := Roe \cdot S1(Usm) \cdot Um$

$Usmmin := u1 + Um$ $Usmmax := u4 - Um$ //Диапазон изменения смещения

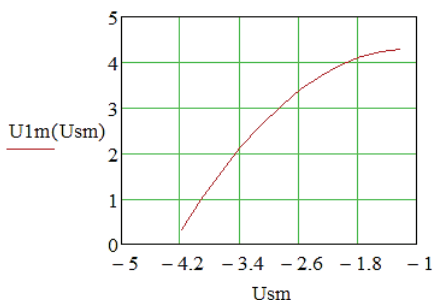
$n := 12$ //Количество точек для расчета СМХ

$dUsm := \frac{Usmmax - Usmmin}{n - 1} = 0.271$ //Шаг изменения смещения

$Usm := Usmmin, Usmmin + dUsm \dots Usmmax$ //Uсм

$U_{sm} = S1(U_{sm}) = U1m(U_{sm}) =$ //Результаты расчета СМХ

-4.19	0.28	0.318
-3.919	0.872	0.989
-3.648	1.409	1.598
-3.377	1.892	2.145
-3.106	2.32	2.631
-2.835	2.693	3.054
-2.565	3.012	3.416
-2.294	3.276	3.715
-2.023	3.486	3.953
-1.752	3.641	4.129
-1.481	3.741	4.243
-1.21	3.787	4.294



$U_{sm0} := -3.4$ //Линейный участок от -4,2В до -2,6В, середина -3,4В

$U\Omega_{max} := 0.8$

$U\Omega := 0, 0.1 \dots U\Omega_{max}$ //UΩ изменяется от 0 до UΩmax=0,8В с шагом 0.1В

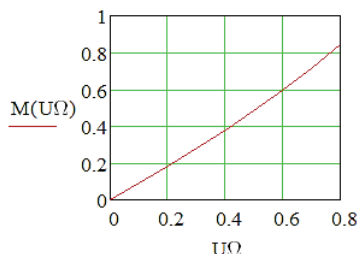
$U1max(U\Omega) := U1m(U_{sm0} + U\Omega)$ //Описание функции ДМХ

$U1min(U\Omega) := U1m(U_{sm0} - U\Omega)$

$$M(U\Omega) := \frac{U1max(U\Omega) - U1min(U\Omega)}{U1max(U\Omega) + U1min(U\Omega)}$$

$U\Omega = U1max(U\Omega) \ U1min(U\Omega) \ M(U\Omega) =$ //Результаты расчета ДМХ

0	2.102	2.102	0
0.1	2.29	1.905	0.092
0.2	2.47	1.7	0.185
0.3	2.641	1.486	0.28
0.4	2.804	1.264	0.379
0.5	2.959	1.034	0.482
0.6	3.105	0.795	0.592
0.7	3.243	0.547	0.711
0.8	3.372	0.292	0.841



Характеристики модулятора при кусочно-линейной аппроксимации
(рекомендуется выполнять отдельным файлом)

$U_n := -3.1$ //Параметры аппроксимации из работы № 3,
 $S := 4.2$ // U_n [В], S [мА/В]
 $R_{oe} := 5.4$ // R_{oe} [кОм] из работы № 3
 $U_m := 0.49$ //Амплитуда входного несущего колебания
 //(необходимо выполнить расчет для двух значений U_m)

$$cs\theta(U_m) := \frac{U_n - U_m}{U_m} \quad // \text{Описание функции CMX}$$

$$\theta(U_m) := \frac{180}{\pi} \cdot \arccos(cs\theta(U_m))$$

$$\theta_{rad}(U_m) := \frac{\pi}{180} \cdot \theta(U_m)$$

$$\gamma_1(U_m) := \frac{(\theta_{rad}(U_m) - \sin(\theta_{rad}(U_m)) \cdot \cos(\theta_{rad}(U_m)))}{\pi}$$

$$S_1(U_m) := S \cdot \gamma_1(U_m)$$

$$U_{1m}(U_m) := R_{oe} \cdot S_1(U_m) \cdot U_m$$

$$U_{smmin} := U_n - U_m \quad U_{smmax} := U_n + U_m \quad // \text{Диапазон изменения } U_{sm}$$

$$U_{smmin} = -3.59 \quad U_{smmax} = -2.61$$

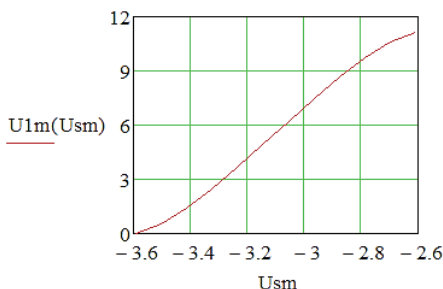
$$n := 12 \quad // \text{Кол-во точек CMX}$$

$$dU_m := \frac{U_{smmax} - U_{smmin}}{n - 1} = 0.089 \quad // \text{Шаг изменения } U_{sm}$$

$$U_m := U_{smmin}, U_{smmin} + dU_m .. U_{smmax} \quad // \text{Значения } U_m$$

$$U_m = \quad cs\theta(U_m) = \theta(U_m) = \quad \gamma_1(U_m) = \quad S_1(U_m) = \quad U_{1m}(U_m)$$

-3.59	1	0	0	0	0
-3.501	0.818	35.1	0.045	0.19	0.503
-3.412	0.636	50.5	0.124	0.522	1.38
-3.323	0.455	63	0.221	0.928	2.455
-3.234	0.273	74.2	0.329	1.38	3.651
-3.145	0.091	84.8	0.442	1.857	4.914
-3.055	-0.091	95.2	0.558	2.343	6.199
-2.966	-0.273	105.8	0.671	2.82	7.462
-2.877	-0.455	117	0.779	3.272	8.658
-2.788	-0.636	129.5	0.876	3.678	9.733
-2.699	-0.818	144.9	0.955	4.01	10.61
-2.61	-1	180	1	4.2	11.113



//График СМХ

$$U_{sm0} := U_n = -3.1$$

$$U_{\Omega max} := U_m = 0.49$$

$$U_{\Omega line} := 0.3$$

//Линейный участок

//от -3,4В до -2,8В

Расчет ДМХ

$$n1 := 20$$

//Количество точек

$$dU_{\Omega} := \frac{U_{\Omega max}}{n1 - 1} = 0.054$$

//Шаг изменения UΩ для расчета ДМХ

$$U_{\Omega} := 0, dU_{\Omega} .. U_{\Omega max}$$

//UΩ изменяется от 0 до UΩmax с шагом dUΩ

$$U1max(U_{\Omega}) := U1m(U_{sm0} + U_{\Omega})$$

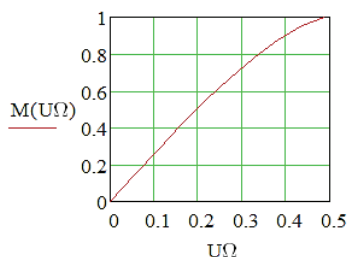
//Описание функции ДМХ

$$U1min(U_{\Omega}) := U1m(U_{sm0} - U_{\Omega})$$

$$M(U_{\Omega}) := \frac{U1max(U_{\Omega}) - U1min(U_{\Omega})}{U1max(U_{\Omega}) + U1min(U_{\Omega})}$$

$U_{\Omega} =$ $U1max(U_{\Omega})$ $U1min(U_{\Omega})$ $M(U_{\Omega}) =$ //Результаты расчета

0	5.557	5.557	0
0.054	6.341	4.772	0.141
0.109	7.116	3.997	0.281
0.163	7.87	3.243	0.416
0.218	8.594	2.519	0.547
0.272	9.274	1.839	0.669
0.327	9.896	1.217	0.781
0.381	10.438	0.675	0.879
0.436	10.87	0.243	0.956
0.49	11.113	0	1



Приложение 9

(рекомендуемое)

Пример выполнения расчетов к лабораторной работе № 5 в программе Mathcad

Детекторная характеристика при полиномиальной аппроксимации

```

A0 := 12.131      //Коэффициенты полинома, взяты из работы №3
A1 := 3.329      //mA, mA/B, mA/B2, mA/B3
A2 := -0.416
A3 := -0.124

Rn := 2          //Сопротивление нагрузки Rn в кОм

Usm := -2.5      //Uсм1 из работы №3

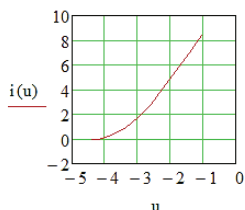
u1 := -4.4      u4 := -1    //Напряжение uзи в крайних узлах аппроксимации

```

```

i(u) := A0 + A1·u + A2·u2 + A3·u3    //Построение графика
                                         //аппроксимирующей функции
u := u1, u1 + 0.2.. u4                 //для проверки

```



```

|u1 - Usm| = 1.9    //Определение
                    //расстояния
|u4 - Usm| = 1.5    //от Uсм до крайних
                    //узлов аппроксимации

```

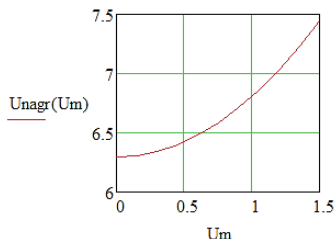
$$I0(Um) := A0 + A1 \cdot Usm + A2 \cdot Usm^2 + A3 \cdot Usm^3 + \left(\frac{A2}{2} + \frac{3 \cdot A3 \cdot Usm}{2} \right) \cdot Usm^2$$

Unagr(Um) := Rn · I0(Um) //Функции, описывающие детекторную хар-ку

Um := 0, 0.15.. 1.5 //Um изменяется от 0 до 1,5В, чтобы не выйти за u1...u4

Um = Unagr(Um) = //Результаты расчета

0	6.292
0.15	6.304
0.3	6.338
0.45	6.396
0.6	6.477
0.75	6.581
0.9	6.708
1.05	6.859
1.2	7.032
1.35	7.229
1.5	7.449



Детекторная характеристика при кусочно-линейной аппроксимации
(рекомендуется выполнять отдельным файлом)

$U_n := -3.1$ $S := 4.2$ //Параметры аппроксимации, U_n [В], S [мА/В]
//из работы №3
 $R_n := 2$ //Сопротивление нагрузки R_n [кОм]

$cs\theta(U_m, U_{sm}) := \frac{U_n - U_{sm}}{U_m}$ //Определение функций,
//описывающих детекторную характеристику

$\theta(U_m, U_{sm}) := \begin{cases} 180 & \text{if } cs\theta(U_m, U_{sm}) < -1 \\ 0 & \text{if } cs\theta(U_m, U_{sm}) > 1 \\ \left(\frac{180}{\pi} \cdot \arccos(cs\theta(U_m, U_{sm})) \right) & \text{otherwise} \end{cases}$

$\theta_{rad}(U_m, U_{sm}) := \frac{\pi}{180} \cdot \theta(U_m, U_{sm})$

$\gamma_0(U_m, U_{sm}) := \frac{\sin(\theta_{rad}(U_m, U_{sm})) - \theta_{rad}(U_m, U_{sm}) \cdot \cos(\theta_{rad}(U_m, U_{sm}))}{\pi}$

$I_0(U_m, U_{sm}) := \begin{cases} 0 & \text{if } cs\theta(U_m, U_{sm}) > 1 \\ S \cdot (U_{sm} - U_n) & \text{if } cs\theta(U_m, U_{sm}) < -1 \\ S \cdot U_m \cdot \gamma_0(U_m, U_{sm}) & \text{otherwise} \end{cases}$ //Учет условий (5.9)
//через $\cos\theta$

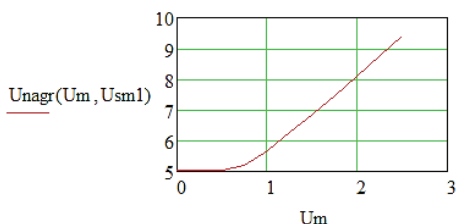
$U_{nagr}(U_m, U_{sm}) := R_n \cdot I_0(U_m, U_{sm})$

$U_{sm1} := -2.5$ //Расчет для U_{sm1}

$U_m := 0.001, 0.001 + 0.25 \dots 2.6$ // U_m изменяется от 0.001В, чтобы избежать
//деления на ноль при вычислении $\cos\theta$

$U_m =$ $cs\theta(U_m, U_{sm1})$ $\theta(U_m, U_{sm1})$ $=$ $\gamma_0(U_m, U_{sm1})$ $=$ $U_{nagr}(U_m, U_{sm1})$ $=$

1·10 ⁻³	-600	180	1	5.04
0.251	-2.39	180	1	5.04
0.501	-1.198	180	1	5.04
0.751	-0.799	143.028	0.826	5.212
1.001	-0.599	126.827	0.677	5.694
1.251	-0.48	118.66	0.595	6.258
1.501	-0.4	113.562	0.544	6.859
1.751	-0.343	110.039	0.509	7.479
2.001	-0.3	107.449	0.483	8.113
2.251	-0.267	105.459	0.463	8.754
2.501	-0.24	103.881	0.447	9.401

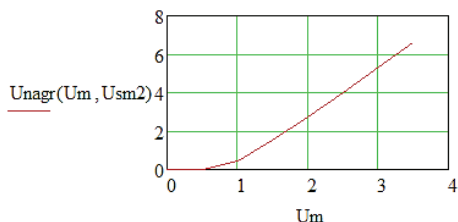


Usm2 := -3.8 //Расчет для Uсм2

Um := 0.001, 0.001 + 0.5 .. 4

Um = csθ(Um, Usm2) : θ(Um, Usm2) = γ0(Um, Usm2) = Unagr(Um, Usm2) =

1·10 ⁻³	700	0	0	0
0.501	1.397	0	0	0
1.001	0.699	45.629	0.05	0.423
1.501	0.466	62.202	0.12	1.518
2.001	0.35	69.523	0.163	2.741
2.501	0.28	73.746	0.191	4.011
3.001	0.233	76.511	0.21	5.303
3.501	0.2	78.466	0.225	6.609



Расчеты для диодного детектора

Sd := 10⁻² Rn1 := 10·10³ Rn2 := 10³ //Исходные данные

$\theta_d(Rnagr) := \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \pi}{Sd \cdot Rnagr}}$ $\theta_{grad}(Rnagr) := \theta_d(Rnagr) \cdot \frac{180}{\pi}$

Kd(Rnagr) := cos(θd(Rnagr))

θgrad(Rn1) = 26.074 θgrad(Rn2) = 56.175 //Результаты расчета θ и Кд

Kd(Rn1) = 0.898 Kd(Rn2) = 0.557

f := 50·10³ F_{св} := 200 //Расчет Снопт

$C_{nopt} := \frac{1}{Rn1 \cdot \sqrt{f \cdot F}} = 3.162 \times 10^{-8}$

Приложение 10

(справочное)

Перечень используемых сокращений

АМ — амплитудная модуляция, амплитудно-модулированный
АЦП — аналого-цифровой преобразователь
АЧХ — амплитудно-частотная характеристика
ДМХ — динамическая модуляционная характеристика
ИПУ — интерактивная панель управления
КПД — коэффициент полезного действия
КЧХ — комплексная частотная характеристика
НЧ — низкая частота, низкочастотный
ОС — обратная связь
ООС — отрицательная обратная связь
ПК — персональный компьютер
ПО — программное обеспечение
ПОС — положительная обратная связь
СМХ — статическая модуляционная характеристика
ФЧХ — фазочастотная характеристика
ЦАП — цифроаналоговый преобразователь
ELVIS — Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite
NI — National Instruments
PCI — Peripheral component interconnect

Учебное издание

Шилов Юрий Владиславович

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

Редактор И. В. Меркурьева
Верстка О. П. Игнатъевой

Подписано в печать 22.03.2017. Формат 60×84/16.
Бумага писчая. Печать цифровая. Гарнитура Newton.
Уч.-изд. л. 6,8. Усл. печ. л. 9,3. Тираж 50 экз.
Заказ 10

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8(343)375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8(343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: 8(343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru

